



**Guilherme António
Marianito Ascensão**

**Desenvolvimento e caracterização de argamassas
multifuncionais**



**Guilherme António
Marianito Ascensão**

**Desenvolvimento e caracterização de argamassas
multifuncionais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Civil, realizada sob orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Doutor João António Labrincha Baptista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

O Júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa

Professora Associada da Universidade de Aveiro

Doutora Maria Paula da Silva Seabra

Investigadora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira

Professor Associado da Universidade de Aveiro (Orientador)

Agradecimentos

Ao terminar este trabalho quero manifestar um sincero agradecimento a todos aqueles que contribuíram a diferentes níveis para a sua realização.

É meu desejo destacar com especial ênfase o apoio e orientação científica do Doutor Vítor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira e do Doutor João António Labrincha Baptista a quem manifesto o meu profundo agradecimento.

Ao Doutor Luciano Senff agradeço a sua crítica assertiva e sugestões sempre válidas. O incentivo prestado e a rigorosidade por si incutida contribuíram de forma determinante para a realização deste trabalho.

Aos Doutor(s) David Maria Tobaldi e Regina Célia Espinosa Modolo, com quem tive o orgulho e privilégio de colaborar, agradeço pela disponibilidade, amabilidade e sabedoria partilhada.

Cabe-me também agradecer o acolhimento no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, destacando a colaboração técnica e auxílio prestado pela Engenheira Maria Carlos Figueiredo e pelo técnico laboratorial Vítor Rodrigues.

Finalmente uma palavra de gratidão à minha família e amigos, em especial ao meus pais pelo apoio, esforço e abnegação em tantos momentos ao longo do meu percurso académico.

Palavras-chave

Argamassas multifuncionais; Modelação térmica; Descontaminação de poluentes aéreos; Modelação higroscópica

Resumo

A necessidade de redução do impacto ambiental surge atualmente como um dos principais desafios do setor da construção. O desenvolvimento de novos produtos com menor energia incorporada durante o seu ciclo de vida é portanto vital à viabilidade ambiental e económica desta indústria. A otimização e o incremento de novas funcionalidades que as argamassas tradicionais não possuem permitirá acentuar o seu carácter de agente ativo na modelação térmica, higroscópica e no controlo da qualidade do ar. O presente trabalho reporta esta nova abordagem na formulação de argamassas. Tendo por base uma argamassa pré-doseada comercial testou-se a incorporação de diversos aditivos, nomeadamente *phase change materials*, dióxido de titânio, polímeros superabsorventes, vermiculite expandida, fibras de celulose e aglomerados de cortiça. A introdução de aditivos gera alterações estruturais complexas sendo necessário o controlo e reajuste das formulações para que não se comprometam propriedades fundamentais da argamassa. Após o devido enquadramento e caracterização geral de cada aditivo, procedeu-se à definição de formulações contendo diferentes percentagens de cada aditivo. O desempenho mecânico e funcional foi então estudado procurando aferir o impacto de tais adições. Numa fase posterior, e considerando o impacto de cada aditivo e da sua percentagem de adição, procurou-se melhorar o desempenho funcional conjugando aditivos. Os resultados obtidos indicam potencialidades e limitações relativamente ao uso dos aditivos definidos neste trabalho, porém comprovou-se a possibilidade de formular argamassas contendo múltiplos aditivos, e assim melhorar as características funcionais das argamassas tradicionais.

Keywords

Multi-functional mortars; Temperature control, Air pollutants removal; Moisture buffering control

Abstract

The current need to reduce its environmental impact is one of the biggest challenges for the construction sector. Therefore, the development of new products with lower embodied energy over its life cycle is environmentally and economically vital to the viability of this industry. This work reports a new approach to mortars formulation. The optimization and increasement of mortars abilities to act as a active agent in thermal and hygroscopic control, and air pollutants removal is the aim of this report. A commercial pre-mixed mortar was used as base. The incorporation of several additives including phase change materials, titanium dioxide, super absorbent polymers, vermiculite, cellulose fibers and agglomerated cork was tested. The introduction of this additives creates complex structural changes being necessary the control and adjustment of the formulations to not compromise fundamental mortars properties. A general framework and characterization of each additive was performed to proceeded the definition of the mortars formulations. The mechanical and functional mortars performance was assessed. Considering the impact of each additive and its content, it was tried to improve the functional performance of mortars combining additives. The results indicates some limitations regarding the use of the selected additives, however has shown the possibility to design mortars containing multiple additives, and therefore improve mortars functional characteristics.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
2	Sustentabilidade e os materiais de construção	3
2.1	Construção sustentável	3
2.2	Seleção dos materiais sustentáveis	3
3	Funcionalização de materiais de construção	5
3.1	Materiais para modelação térmica	5
3.1.1	Materiais de mudança de fase	5
3.1.2	Requisitos técnicos	8
3.1.3	Classes dos materiais de mudança de fase	9
3.1.4	Incorporação de <i>PCM's</i> em materiais de construção	11
3.1.5	Problemas técnicos na aplicação de <i>PCM's</i>	14
3.2	Materiais com propriedades fotocatalíticas	15
3.2.1	Materiais nanométricos	15
3.2.2	Fotocatálise - Enquadramento e aplicações	16
3.2.3	Descrição do processo fotocatalítico	17
3.2.4	Fatores influenciadores do processo fotocatalítico	20
3.2.5	Degradação de poluentes do ar interior	20
3.2.6	Capacidade autolimpante e autoesterilizante	21
3.3	Materiais para modelação higroscópica	23
3.3.1	Agentes porogéneos e superabsorventes	23
3.3.2	Transferência de humidade em materiais porosos	23
3.3.3	Higroscopicidade dos materiais porosos	24
3.3.4	Absorção e dessorção de humidade	25
3.3.5	Histerese	26
3.3.6	Avaliação do controlo de humidade	27
3.3.7	Diferentes níveis de controlo de humidade	27
3.3.8	Comportamento higroscópico dos materiais de construção	30

4	Metodologia experimental	31
4.1	Desenvolvimento de argamassas funcionais	31
4.2	Ensaio de caracterização	38
4.2.1	Argamassa base e aditivos funcionais	38
4.2.2	Caracterização das composições em estado fresco	40
4.2.3	Caracterização das composições em estado endurecido	42
5	Resultados e discussão	49
5.1	Caracterização da argamassa base e aditivos funcionais	49
5.1.1	Caracterização da argamassa base	49
5.1.2	Caracterização dos aditivos incorporados	51
5.2	Caracterização e estudo de desempenho funcional	58
5.2.1	Argamassa base	58
5.2.2	Argamassas com <i>PCM's</i>	68
5.2.3	Argamassas fotocatalíticas	75
5.2.4	Argamassas para modelação higrocópica	82
5.2.5	Argamassas multifuncionais	105
6	Conclusão	123
	Bibliografia	124
A	Apêndice - Síntese das propriedades físicas e mecânicas das argamassas	133
B	Apêndice - Síntese das propriedades funcionais das argamassas	139
C	Apêndice - Ensaio <i>MBV</i>	141

Lista de Tabelas

3.1	Caraterísticas térmicas de alguns <i>PCM's</i> [11].	8
3.2	Propriedades físicas de algumas parafinas [20].	10
3.3	Características térmicas de misturas eutéticas, adaptado de [25]. .	11
3.4	Semicondutores comuns em processos fotocatalíticos e respectivas posições da banda de transição em solução aquosa de pH 1 [54]. . .	18
3.5	Intervalos de classificação do valor de <i>MBV prático</i> [79].	30
3.6	Valores do <i>MBV prático</i> de materiais de referência [79].	30
4.1	Síntese das formulações testadas.	36
5.1	Distribuição granulométrica da argamassa TD25.	50
5.2	Massa de água absorvida e libertada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo a metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> da argamassa TD25.	67
5.3	Impacto da adição de <i>PCM</i> no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.	70
5.4	Impacto da adição de TiO_2 no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.	77
5.5	Taxa de degradação de NO_x , avaliada pela constante cinética de pseudo primeira ordem e respetivos coeficientes de correlação. . . .	80
5.6	Massa de TiO_2 na superfície das amostras das diferentes argamassas contendo TiO_2	81
5.7	Impacto da adição de <i>SAP</i> no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.	85
5.8	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> da argamassa A1SAP.	86
5.9	Impacto da adição de V_{er} no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.	89
5.10	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> das argamassas com V_{er}	90
5.11	Impacto no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade da introdução de Fb_{Cel}	92

5.12	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> das argamassas com Fb_{Cel} .	93
5.13	Impacto no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade da introdução de C_{rt} .	97
5.14	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> das argamassas com C_{rt} .	98
5.15	Impacto no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade da introdução de múltiplos aditivos para modelação higroscópica.	102
5.16	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> das argamassas biaditivadas para controlo higroscópico.	104
5.17	Impacto da adição de múltiplos aditivos no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.	106
5.18	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> das argamassas bifuncionais.	108
5.19	Evolução da viscosidade plástica e tensão de escoamento ao longo do tempo das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	110
5.20	Processo de absorção e dessorção de água por capilaridade de argamassa multifuncionais.	112
5.21	Taxa de degradação de NO_x , avaliada pela constante cinética de pseudo primeira ordem e respetivos coeficientes de correlação.	118
5.22	Massa de TiO_2 na superfície das amostras estimado por EDS/SEM.	120
5.23	Taxa de degradação de RhB sob irradiação solar.	120
5.24	Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> e valor de <i>MBV</i> daa argamassa A2nT1SAP4,3F20P.	121
A.1	Propriedades físicas e mecânicas da argamassa referência e de argamassas monoaditivadas (parte 1).	134
A.2	Propriedades físicas e mecânicas da argamassa referência e de argamassas monoaditivadas (parte 2).	135
A.3	Propriedades físicas e mecânicas das argamassas biaditivadas e multifuncionais (parte 1).	136
A.4	Propriedades físicas e mecânicas das argamassas biaditivadas e multifuncionais (parte 2).	137
B.1	Propriedades funcionais da argamassa referência e de argamassas mono, bi e multiaditivadas.	140

Lista de Figuras

3.1	<i>PCM</i> microencapsulado, adaptado de [12].	6
3.2	Alteração da temperatura em função do tempo: processo de armazenamento e libertação térmica, adaptado de [14].	7
3.3	Diminuição do gradiente térmico em células de teste revestidas por argamassas contendo <i>PCM</i> (Micronal DS 5008), adaptado de [16]. .	7
3.4	Classe de materiais considerando o seu ponto e entalpia de fusão [19].	9
3.5	Macroencapsulamento em bolsas [19].	12
3.6	Exemplo de microencapsulamento, adaptado de [27].	13
3.7	Possíveis arranjos espaciais no interior de uma microcápsula [13]. . .	13
3.8	Geometria de parafina microencapsulada avaliada por SEM após submetida a diferente número de ciclos térmicos, adaptado de [30]. .	14
3.9	Esquema representativo das fases envolvidas no processo de fotocatalise, adaptado de [52].	18
3.10	Comportamento hidrófilo de superfície com e sem irradiação UV [68].	22
3.11	Higroscopicidade dos materiais porosos em função da humidade relativa do meio [77].	25
3.12	Etapas de fixação de humidade do interior dos poros [78].	25
3.13	Curvas de absorção isotérmica [78].	26
3.14	Histerese das curvas de absorção e dessorção [73].	27
3.15	Níveis de controlo de humidade num compartimento fechado [79]. .	28
3.16	Ciclo experimental de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> [73].	30
4.1	Protótipos cúbicos de placas isolantes <i>XPS</i> (<i>Wedi</i>).	32
4.2	Setup experimental - Ensaio térmico.	32
4.3	Perfis oscilação de temperatura usados na câmara climática.	32
4.4	Setup experimental de ensaios de degradação de NO_x [64].	33
4.5	Reator e sistema de aquisição de dados.	33
4.6	Contaminação das amostras com corante Rodamina B.	35
4.7	Processo experimental no desenvolvimento de argamassas funcionais.	37
4.8	Equipamento de análise granulométrica.	38
4.9	Equipamento ATG-ATD/DSC	39
4.10	Microscópio eletrónico de varrimento.	40
4.11	Reómetro Viskomat NT.	41

5.1	Curva de distribuição granulométrica diferencial da argamassa TD25.	49
5.2	Análise <i>ATG/ATD</i> da argamassa TD25.	50
5.3	Processo de osmose do poliacrilato de sódio.	53
5.4	Imagens de SEM mostrando a forma irregular das partículas de <i>SAP</i>	53
5.5	Imagens de SEM da evolução das lamelas de vermiculite em função da temperatura:a) 20°C; b) 300°C; c) 600°C; d) 900°C [88].	54
5.6	Vermiculite expandida.	54
5.7	Observação microscópica de fibras de celulose.	55
5.8	<i>ATG/ATD</i> de fibras de celulose.	56
5.9	Aglomerados e estrutura alveolar da cortiça.	57
5.10	<i>ATD/ATG</i> de aglomerados de cortiça.	58
5.11	Impacto da introdução de superplastificante nas propriedades mecânicas da argamassa TD25.	59
5.12	Teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água da argamassa TD25.	60
5.13	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade da argamassa TD25.	60
5.14	Correlação entre o raio do poro e pressão capilar.	61
5.15	Teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade da argamassa TD25.	62
5.16	Ciclos térmicos e respetiva temperatura interna no protótipo revestido por argamassa TD25.	63
5.17	Temperatura interna no protótipo revestido por argamassa TD25 durante ciclos com diferentes %HR.	64
5.18	Diminuição da temperatura interna no protótipo revestido por argamassa TD25 durante a fase de arrefecimento.	64
5.19	Diminuição da concentração de NO_x no interior do reator com argamassa TD25.	65
5.20	Semiquantificação por EDS de elementos presentes na superfície da argamassa TD25.	66
5.21	Variação da massa da argamassa TD25 registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	67
5.22	Evolução do teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade com a adição de <i>PCM</i>	68
5.23	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição de <i>PCM</i>	69
5.24	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade das argamassas TD25 e A20P.	69
5.25	Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de <i>PCM</i>	70
5.26	Evolução térmica da superfície do corpo a cada 5 minutos.	71
5.27	Variação da temperatura na câmara climática e no interior dos protótipos e gradiente térmico em função de tempo durante o ensaio térmico segundo o perfil de temperaturas 1.	72

5.28	Gradiente térmico entre protótipo TD25 e A20P em função do tempo durante o ensaio térmico segundo o perfil de temperaturas 1.	72
5.29	Variação da temperatura na câmara climática e no interior dos protótipos e gradiente térmico em função de tempo durante o ensaio térmico segundo o perfil de temperaturas 2.	74
5.30	Variação do impacto térmico da introdução de <i>PCM</i> na argamassa TD25 em função do teor de humidade relativa.	75
5.31	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água nas argamassas com TiO_2	76
5.32	Evolução do teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade nas argamassas com TiO_2	76
5.33	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade da argamassa TD25 e das argamassas com TiO_2	77
5.34	Alteração da microestrutura com a adição de diferentes quantidade de TiO_2	78
5.35	Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de TiO_2	78
5.36	Diminuição da concentração de NO_x na atmosfera sob radiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,2 ppmv).	79
5.37	Diminuição da concentração de NO_x na atmosfera sob radiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,5 ppmv).	80
5.38	Taxa de degradação fotocatalítica total de NO_x	80
5.39	Mapeamento superficial das partículas de TiO_2 nas diferentes argamassas, obtido por SEM/EDS.	81
5.40	Degradação de Rodamina B.	82
5.41	Evolução do teor de água de amassadura e das propriedades mecânicas com a adição de <i>SAP</i>	83
5.42	Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de <i>SAP</i>	84
5.43	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição <i>SAP</i>	84
5.44	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade da argamassa TD25 e argamassas com <i>SAP</i>	85
5.45	Variação da massa da argamassa A1SAP registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	86
5.46	Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição V_{er}	87
5.47	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição V_{er}	88
5.48	Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de V_{er}	88
5.49	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade das argamassas contendo V_{er}	89

5.50	Variação da massa da argamassa A5V registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> . . .	90
5.51	Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de Fb_{Cel}	91
5.52	Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de Fb_{Cel}	91
5.53	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição de Fb_{Cel}	92
5.54	Curva de absorção e dessorção de água de argamassas contendo Fb_{Cel} . . .	93
5.55	Variação da massa da argamassa A2,2F registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> . . .	94
5.56	Variação da massa da argamassa A4,3F registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> . . .	94
5.57	Argamassa A6,3F após sucessivos ciclos de submersão e secagem. . .	94
5.58	Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de C_{rt}	95
5.59	Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de C_{rt}	96
5.60	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição de C_{rt}	96
5.61	Curva de absorção e dessorção de água de argamassas contendo C_{rt} . . .	96
5.62	Variação da massa da argamassa A2,4C registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> . . .	97
5.63	Variação da massa da argamassa A4,7C registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> . . .	98
5.64	Argamassa A6,9C após sucessivos ciclos de submersão e secagem. . .	99
5.65	Teor de água de amassadura e propriedades mecânicas de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.	100
5.66	Teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.	101
5.67	Módulo de elasticidade e densidade aparente de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.	101
5.68	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.	102
5.69	Variação da massa da argamassa A1SAP7,5V registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	103
5.70	Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água de argamassa multifuncionais.	105
5.71	Evolução do teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade de argamassa multifuncionais.	106
5.72	Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade de argamassas multifuncionais.	106

5.73	Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas de argamassas multifuncionais.	107
5.74	Evolução do torque em função do tempo para as argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	109
5.75	Evolução temporal da relação entre velocidade de rotação e torque nas argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	110
5.76	Relação entre velocidade de rotação e força de torque nas fases de redução da aceleração dos ensaios reológicos das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	111
5.77	Teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	112
5.78	Curva de absorção e dessorção água por capilaridade das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	112
5.79	Teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	113
5.80	Teor de água de amassadura e propriedades mecânicas das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.	113
5.81	Evolução temporal da retração da argamassas TD25 e da argamassa A2nT1SAP4,3F20P.	114
5.82	Evolução temporal da absorção superficial da argamassa TD25 e da argamassa A2nT1SAP4,3F20P.	114
5.83	Evolução temporal da temperatura à superfície dos corpos.	115
5.84	Temperatura e gradiente térmico em função de tempo durante o perfil 1 de temperaturas.	116
5.85	Temperatura e gradiente térmico em função de tempo durante o perfil 2 de temperaturas.	117
5.86	Variação do impacto térmico da argamassa A2nT1SAP4,3F20P em função do teor de humidade relativa.	117
5.87	Diminuição da concentração de NO_x sob irradiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,2 ppmv).	118
5.88	Diminuição da concentração de NO_x sob irradiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,5 ppmv).	119
5.89	Taxa de degradação fotocatalítica de NO_x das argamassas TD25, A2nT e A2nT1SAP4,3F20P.	119
5.90	Distribuição superficial das partículas de TiO_2 na superfície da argamassa A2nT1SAP4,3F20P.	120
5.91	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP4,3F20P registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	121
C.1	Variação da massa da argamassa A7,5V registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	141
C.2	Variação da massa da argamassa A10V registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	141

C.3	Variação da massa da argamassa A15V registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i> . . .	142
C.4	Variação da massa da argamassa A1SAP10V registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	142
C.5	Variação da massa da argamassa A1SAP2,2F registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	142
C.6	Variação da massa da argamassa A1SAP4,3F registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	143
C.7	Variação da massa da argamassa A1SAP2,4C registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	143
C.8	Variação da massa da argamassa A1SAP4,7C registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	143
C.9	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP7,5V registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	144
C.10	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP10V registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	144
C.11	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP2,2F registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	144
C.12	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP4,3F registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	145
C.13	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP2,4C registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	145
C.14	Variação da massa da argamassa A2nT1SAP4,7C registrada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia <i>NordTest</i>	145

Nomenclatura

Simbologia, siglas e abreviaturas

<i>AVAC</i>	–	Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado
<i>ZEB</i>	–	<i>Nearly Zero-Energy Building</i>
<i>PCM</i>	–	<i>Phase change materials</i>
<i>TESS</i>	–	<i>Thermal energy storage systems</i>
<i>ESC</i>	–	<i>Enviroment stress cracking</i>
COV	–	Compostos orgânicos voláteis
QAI	–	Qualidade do ar interior
NO_2	–	Dióxido de nitrogénio
NO_x	–	Óxidos de nitrogénio
UV	–	Radiação ultra violeta
TiO_2	–	Dióxido de titânio
<i>AOP</i>	–	Processos de oxidação avançados
HO^*	–	Radicais hidróxilos
O_2^-	–	Iões superóxido
BV	–	Banda de valência
BC	–	Banda de condução
H_2O	–	Hidróxido de hidrogénio
h	–	Constante de Planck
CO_2	–	Dióxido de carbono
η	–	Eficácia do processo de degradação fotocatalítica
$C_{inicial}$	–	Concentração inicial
C_{final}	–	Concentração final
<i>RhB</i>	–	Rodamina B
PAH	–	Hidrocarboneto aromático policíclico
<i>MBV</i>	–	<i>Moisture buffer value</i>
<i>ppmv</i>	–	Partes por milhões por volume
ATG	–	Análise termogravimétrica
ATD	–	Análise térmica diferencial
MEV	–	Microscopia eletrónica de varrimento

CaO	–	Óxido de cálcio
$CaCO_3$	–	Carbonato de cálcio
DSC	–	Calorimetria diferencial de varrimento
C_c	–	Coeficiente de absorção capilar
V_{assimp}	–	Valor assintótico
I_s	–	Índice de secagem
SP	–	Superplastificante

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O consumo energético e as alterações climáticas são hoje em dia os principais desafios com que a humanidade se depara. O aumento populacional e o desenvolvimento industrial resultaram num acréscimo exponencial da necessidade energética mundial, resultando esse facto em severos problemas ambientais à escala global. O setor da construção civil representa cerca de 40% do consumo total energético de origem fóssil à escala global, sendo responsável pela emissão de 20 a 40% das emissões de gases estufa [1]. A redução da energia consumida durante o período de vida útil das construções, o aumento da eficiência energética dos edifícios e uma maior utilização de fontes renováveis de energia são fatores decisivos para a redução da dependência energética de origem fóssil e a obtenção duma construção mais sustentável e simultaneamente, economicamente viável. Uma preocupação crescente com a necessidade de redução do impacto ambiental do setor da construção fez surgir novas soluções construtivas e novos materiais visando o desenvolvimento sustentável do setor.

Atualmente, estima-se que em média cada pessoa permaneça cerca de 90% do tempo no interior de edifícios [2], sendo necessário garantir adequado nível de conforto térmico e qualidade do ar. Tradicionalmente a manutenção destes parâmetros é feita com recurso a sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (*AVAC*) acarretando elevados custos operacionais e aumentando o impacto energético e ambiental das edificações.

Normativas europeias impõem que toda a construção nova a partir de 2020 consuma o mínimo de energia possível, aproximando o modelo construtivo atual do conceito de *nearly Zero-Energy Building (ZEB)*. A energia consumida deverá ser preferencialmente oriunda de fontes renováveis produzidas a nível local. Enquadrado no programa europeu Horizonte 2020, todos os estados membros, farão entrar em vigor normas legislativas que transpõem diretivas europeias adaptadas às especificidades construtivas e climáticas de cada estado membro. Torna-se então imperativo o desenvolvimento de novos materiais e soluções construtivas que contribuam para a manutenção de níveis de conforto térmico e qualidade do ar interior

de forma passiva, dotando novos materiais de capacidade de reação autónoma na afetação e modelação climática da sua envolvente (*responsive systems*) [3, 4].

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de argamassas multifuncionais conferindo-lhe, através de diferentes adições, características especiais como propriedades de modelação térmica e higroscópica, funções autolimpantes e capacidade de degradação de poluentes gasosos. Deste modo pretende-se funcionalizar argamassas que garantam uma superior qualidade do ar interior, melhorando assim o desempenho ambiental e energético de edifícios novos ou reabilitados.

De forma a garantir a manutenção dos níveis de conforto térmico, diminuindo a necessidade energética dos edifícios, serão formuladas argamassas com capacidade de armazenamento e libertação de calor latente. Desta forma pretende-se diminuir o gradiente térmico no interior das edificações, reduzindo assim a necessidade de funcionamento de sistemas de aquecimento e arrefecimento. Testar-se-á a incorporação de materiais de mudança de fase (*phase change materials*, *PCM's*) numa argamassa comercial mista, quantificando-se o efeito de modelação térmica exercido pela adição de *PCM*.

De forma a garantir a qualidade do ar interior e propriedades de autolimpeza, desenvolver-se-ão argamassas fotocatalíticas contendo materiais com capacidade de degradação de poluentes gasosos existentes no ar interior.

A minimização dos gradientes diários e sazonais dos valores de humidade relativa em ambientes interiores tentará ser alcançada através da incorporação de agentes superabsorventes e porogéneos (individual e conjuntamente) tentando melhorar as propriedades higroscópicas das argamassas.

O impacto da adição de tais aditivos funcionais nas propriedades químicas, físicas e mecânicas das argamassas será avaliado e tido em consideração no processo de desenvolvimento de argamassas multifuncionais. A influência de múltiplos aditivos no desempenho global da argamassa será avaliada e otimizada, procurando conceber uma formulação multifuncional com características mecânicas, físicas e químicas que respeitem as exigências impostas pelas normativas vigentes para argamassas de revestimento.

Capítulo 2

Sustentabilidade e os materiais de construção

2.1 Construção sustentável

A transposição do conceito de sustentabilidade para o setor da construção civil visa a minimização dos impactos ambientais recorrendo a soluções construtivas e materiais com melhor desempenho energético, socialmente responsáveis e economicamente viáveis [5]. A construção sustentável tem assim por princípio base reduzir o consumo de recursos e emissões ambientais, diminuindo simultaneamente o custo de ciclo de vida dos edifícios [6].

Além da componente ética presente numa construção sustentável, a nível económico os edifícios sustentáveis apresentam, na totalidade do seu ciclo de vida, um menor custo sendo a redução proveniente dos menores encargos operacionais e da minimização do custo relativo à fase de demolição [7].

A redução da necessidade energética dos edifícios poderá ser alcançada através da conjugação de fatores tais como a consciencialização e alteração dos hábitos de consumo dos seus ocupantes, a substituição de equipamentos por outros mais eficientes e a adoção de materiais e técnicas construtivas com menor energia incorporada. A aplicação de materiais e técnicas construtivas com menor energia incorporada no seu ciclo de vida terá um impacto significativo no balanço energético dos edifícios.

2.2 Seleção dos materiais sustentáveis

A sustentabilidade do setor da construção tem a seleção de matérias-primas como uma das suas principais componentes. O ciclo de vida das matérias-primas, ou seja, o conjunto de etapas que tem início com a extração e termina com o destino final dado ao produto após a demolição ou desconstrução do edifício, representa um dos maiores impactos ambientais provenientes do setor da construção.

Kibert *et al.* [7] apresenta um conjunto de critérios aos quais a escolha de materiais e produtos sustentáveis deverá atender:

- Melhoria da qualidade do ar interior;
- Aumento da eficiência energética da construção;
- Baixa energia incorporada;
- Contribuição para a durabilidade do edifício e baixos custos de manutenção;
- Utilização de materiais reciclados ou recicláveis;
- Utilização de materiais com origem em recursos renováveis;
- Baixas emissões de poluentes associadas ao seu ciclo de vida;
- Utilização de materiais de origem local.

As argamassas são amplamente usadas na construção, assegurando uma maior durabilidade dos elementos estruturais, desempenhando simultaneamente funções estéticas de acabamento [8]. A incorporação de novas adições procurando substituir parte dos ligantes tradicionais tem sido objeto de intensivo estudo, visando dotar argamassas de revestimento de propriedades que lhe confirmem melhor desempenho e reduzam o seu impacto ambiental.

O desenvolvimento de argamassas com funcionalidades que melhorem a qualidade do ar interior e a eficiência energética dos edifícios, representará não só a diminuição direta dos custos associados à necessidade de equipamentos mecânicos; como o aumento da durabilidade e a diminuição da necessidade de manutenção, não só a da argamassa mas de todos os componentes constituintes do edificado. Dessa forma pretende-se transpor os princípios base de construção sustentável para a formulação de argamassas [7].

Capítulo 3

Funcionalização de materiais de construção

3.1 Materiais para modelação térmica

O conforto térmico é um conceito com uma forte componente pessoal, pelo que as normas de construção existentes apenas pretendem definir como aceitável um gradiente térmico representativo de condições gerais de conforto em edifícios. A manutenção destas condições térmicas no interior dos edifícios exige muitas vezes a necessidade de aquecimento ou refrigeração (ou ambas) com auxílio de equipamentos de climatização, normalmente associados a sistemas de ventilação. Este tipo de equipamento tem um custo associado bastante elevado representando cerca de 25% da energia consumida pelo setor residencial em Portugal [9]. Este tipo de equipamento poderá ainda representar um potencial problema de saúde pública com a entrada e proliferação de poluentes externos, bactérias, poeiras e fungos ou pela poluição com origem na degradação do próprio equipamento em caso de deficiente manutenção destes sistemas.

O desenvolvimento de soluções passivas como a incorporação de *PCM's* nas argamassas possibilitará a redução do tempo de operacionalidade dos equipamentos de *AVAC* [10] assim como a transferência do período de funcionamento para horários energéticos de menor custo [11]. Desta forma, manter-se-á os níveis de conforto térmico reduzindo os custos operacionais associados.

3.1.1 Materiais de mudança de fase

O armazenamento de energia térmica pode ser conseguido através de processos físicos ou químicos. Em sistemas de armazenamento por processos químicos a energia absorvida e libertada provem da quebra e formação de ligações moleculares. Por sua vez, os sistemas de armazenamento físico de energia térmica baseiam-se na acumulação e libertação de calor latente ou sensível. Para acumulação de quantidades similares de energia térmica, sistemas de acumulação de calor latente requerem um menor volume de material. Em sistemas tradicionais, o armazena-

mento de energia térmica é alcançado recorrendo ao aumento de massa térmica dos elementos estruturais não existindo tal necessidade com a utilização de materiais de mudança de fase (*PCM's*) que apresentam a capacidade de acumular e libertar quantidades significativas de energia térmica.

O processo de transição de fase dos *PCM's* é classificado consoante as fases envolvidas. Desta forma é possível distinguir os *PCM's* mediante a sua composição química e transição de fase em: sólido \leftrightarrow líquido (fusão/solidificação); sólido \leftrightarrow sólido (mudança de uma forma cristalina para outra); sólido \leftrightarrow gasoso (sublimação) e líquido \leftrightarrow gasoso (vaporização/condensação).

As mudanças de fase sólido \leftrightarrow líquido apresentam menor calor latente que as mudanças envolvendo a fase gasosa, não sendo porém alterações de fase líquido \leftrightarrow gasoso utilizadas em sistemas de armazenamento de energia térmica dado o elevado volume necessário na fase gasosa à pressão atmosférica. Nas mudanças de fase sólido \leftrightarrow sólido também se verificam variações volumétricas consideráveis, o que torna inexecutável a sua aplicação em sistemas de armazenamento de calor latente. Apesar das mudanças de fase sólido \leftrightarrow líquido envolverem baixa quantidade de calor latente, as diminutas alterações volumétricas verificadas durante a transição de fase perfilam este tipo de material como adequado no armazenamento de energia térmica em edifícios.

Quando o aumento de temperatura do meio ambiente possibilita a transição de fase dos *PCM's* (sólido \rightarrow líquido), estes acumulam energia térmica diminuindo o aumento da temperatura do meio ambiente que o rodeia. Em sentido oposto, quando se verifica o decréscimo da temperatura do meio ambiente, os *PCM's* libertam a energia térmica acumulada, representando assim um ganho térmico interno e minimizando a descida da temperatura (Figura 3.1 e 3.2)[12, 13, 14].

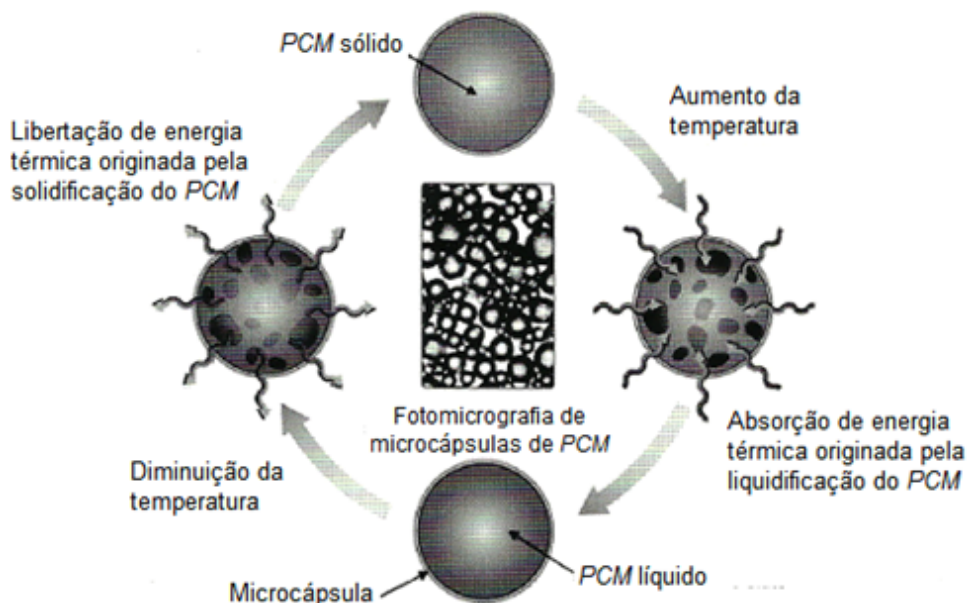


Figura 3.1: *PCM* microencapsulado, adaptado de [12].

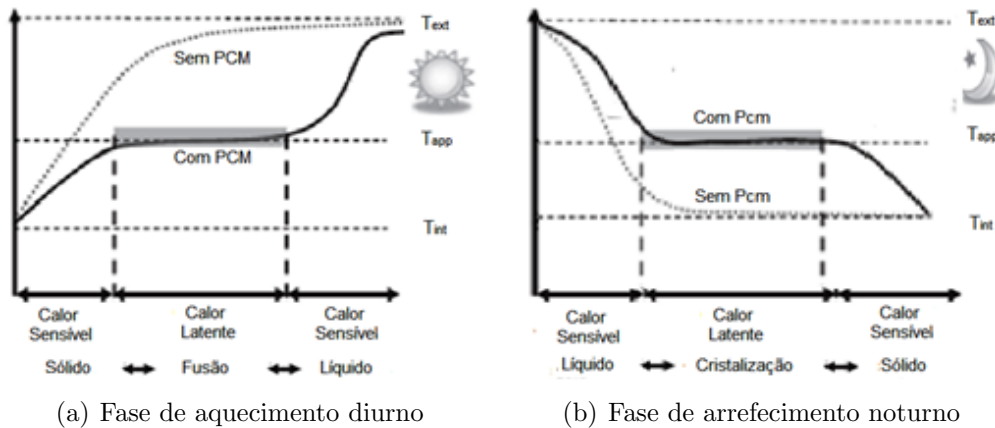


Figura 3.2: Alteração da temperatura em função do tempo: processo de armazenamento e libertação térmica, adaptado de [14].

Os *PCM's* funcionam como reguladores passivos de temperatura, diminuindo as suas flutuações no interior dos edifícios. É expectável que em climas amenos, a transmissão de calor latente em argamassas com *PCM's* seja mais eficaz na primavera e outono. Nestas estações a temperatura ambiente será suficiente durante o dia para que o *PCM* armazene energia térmica e durante a noite as temperaturas serão suficientemente baixas para que este a liberte [15]. Na Figura 3.3 é observável a diminuição do gradiente térmico verificado em corpos de teste revestidos internamente com argamassas com *PCM's*. É ainda observável o atraso dos pontos de temperatura máxima e mínima, retardando-se a eventual entrada em funcionamento de sistemas de *AVAC* [16].

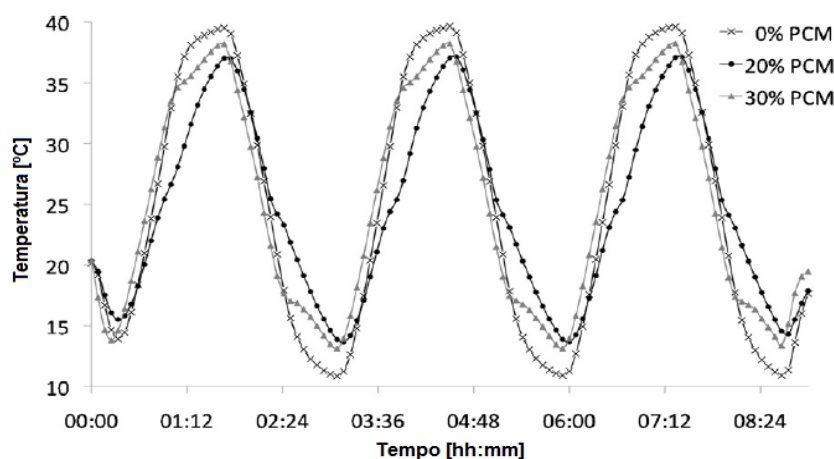


Figura 3.3: Diminuição do gradiente térmico em células de teste revestidas por argamassas contendo *PCM* (Micronal DS 5008), adaptado de [16].

3.1.2 Requisitos técnicos

Na seleção do material de mudança de fase a incorporar em argamassas deverá tomar-se em consideração determinados requisitos técnicos. As características físicas e químicas dos *PCM's* condicionam a sua aplicabilidade, havendo a necessidade de garantir os seguintes critérios: (i) elevado calor de fusão e condutividade térmica, (ii) elevado calor específico, (iii) pequenas variações de volume e baixa pressão de vapor durante a transição de fase, (iv) não corrosividade, (v) não inflamabilidade e toxicidade, (vi) fusão congruente, (vii) baixo risco de superarrefecimento, (viii) estabilidade química, (ix) reversibilidade cíclica da transição de fase e (x) compatibilidade com os materiais da matriz na qual se pretenda aplicar o *PCM* [11, 17, 18].

A Tabela 3.1 lista as características térmicas de alguns *PCM's* investigados na literatura.

Tabela 3.1: Características térmicas de alguns *PCM's* [11].

PCM	Temperatura de transição [°C]	Calor de fusão [KJ/Kg]
Cloreto de cálcio	24-29	192
Hexadecano	18	236
Heptadecano	18	214
Octadecano	22	244
Parafina Negra	25-30	150
Emerest 2325	17-21	138-140
Emerest 2326	18-22	140
Esteareato de butilo	19	140
1-Dodecanol	26	200
Cáprico-Láurico [45/55]	21	143
Cáprico-Láurico [82/18]	19,1-20,4	147
Cáprico-Láurico [61,5/38,5]	19,1	132
Cáprico-Tetradecanóico [73,5/26,5]	21,4	152
Cáprico-Palmítico [75,2/24,8]	22,1	153
Cáprico-Esteareato [86,6/13,4]	26,8	160
Polietilenoglicol	23-26	150,5
Propilo palmítico	19	186

Além de características técnicas associadas à escolha do *PCM*, será ainda necessário ponderar fatores como custo, disponibilidade em larga escala e possibilidade de reciclagem, não se comprometendo desse modo a viabilidade económica da sua incorporação em argamassas.

3.1.3 Classes dos materiais de mudança de fase

Os *PCM's* dividem-se essencialmente em três grandes classes: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas (Figura 3.4). A adição de cada uma das tipologias de *PCM's* na composição de argamassas apresenta vantagens e desvantagens inerentes à sua origem e composição. Em sistemas destinados ao uso em edifícios apenas *PCM's* com temperatura de transição de fase próxima da zona de conforto humano ($\sim 22^{\circ}\text{C}$) devem ser utilizados de forma a que a transição de fase mitigue a necessidade de refrigeração ou aquecimento [19].

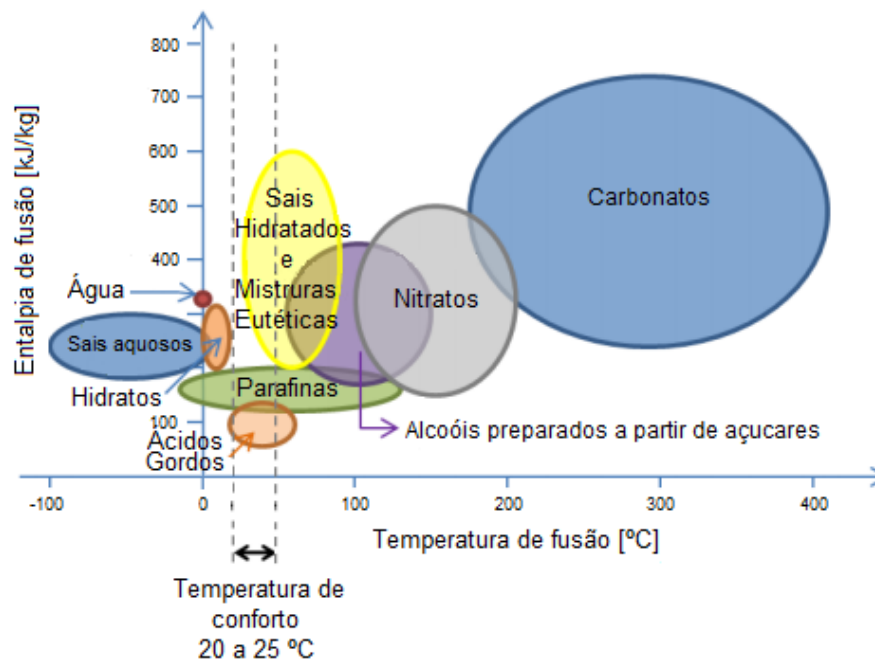


Figura 3.4: Classe de materiais considerando o seu ponto e entalpia de fusão [19].

PCM's inorgânicos

Na classe dos *PCM's* inorgânicos existem materiais de duas origens distintas: (i) os metálicos e os (ii) sais hidratados. A utilização de sais hidratados é mais frequente em sistemas para armazenamento de calor latente. Os sais hidratados apresentam uma elevada capacidade de armazenamento de calor latente, elevada condutividade térmica e entalpia, temperatura de fusão bem definida e não inflamabilidade. Tais características são favoráveis à sua incorporação em argamassas. No entanto nos sais hidratados a fusão efetua-se de forma congruente com a formação de um sal de menor capacidade de armazenamento térmico. Este processo irreversível origina uma contínua diminuição da capacidade de armazenamento térmico, comprometendo a estabilidade cíclica do produto [19]. O fenómeno do superarrefecimento existente nos sais hidratados compromete igualmente a sua aplicabilidade em argamassas [11, 20]. A elevada variação de volume pode diminuir a resistência

mecânica das argamassas onde estes se incorporem. Em argamassas destinadas a aplicação em estruturas de betão armado poderão ocorrer problemas de corrosão nos elementos metálicos dada a natureza salina destes aditivos.

PCM's orgânicos

Apesar de inicialmente descartados como aditivos no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia térmica (*Thermal energy storage systems, TESS*) devido ao seu elevado custo e menor capacidade de armazenamento térmico por unidade de volume comparativamente com materiais de origem inorgânica, os *PCM's* orgânicos encontram-se hoje disseminados em diversas áreas de aplicação. Os *PCM's* orgânicos são mais estáveis física e quimicamente, possuindo bom comportamento térmico e zona de transmissão ajustável [11]. Os ácidos gordos, pela sua origem renovável, apresentam elevado potencial em determinadas áreas de aplicação, acarretando contudo a sua produção elevados custos. A incorporação de ácidos gordos em revestimentos interiores é inviabilizada não só por fatores de ordem económica mas também pela corrosão dos elementos metálicos e pela libertação de um forte odor [21, 22].

Os n-alcenos apresentam como grande vantagem a variedade de temperaturas e entalpias de fusão, permitindo a sua utilização numa elevada gama de temperaturas. À exceção das parafinas comerciais, os n-alcenos têm aplicação restrita devido à elevada pureza das matérias-primas, representando um acréscimo de custo significativo no produto final onde este tipo de *PCM* seja incorporado [19]. A Tabela 3.2 mostra as principais propriedades físicas de algumas parafinas comerciais [20].

Tabela 3.2: Propriedades físicas de algumas parafinas [20].

Parafina	Temperatura de condensação [°C]	Calor de fusão [KJ/Kg]
6106	42-44	189
P116	45-48	210
5838	48-50	189
6035	58-60	189
6499	66-68	189

As parafinas são misturas de alcanos puros tendo como principal desvantagem à incorporação em *TESS* a reduzida entalpia de fusão e baixa condutividade térmica [18]. No entanto, as parafinas apresentam características desejáveis à incorporação em *TESS* como o quase inexistente super arrefecimento e a estabilidade térmica e química, que sugerem potencial na adição em argamassas com funções especiais de armazenamento de calor latente [23].

As parafinas comerciais são geralmente misturas de diferente n-alcenos pretendendo reduzir o custo relativo às matérias-primas, tornado assim o produto comercialmente atrativo. Este fator será decisivo para a comercialização no setor da construção de soluções de armazenamento térmico em edifícios [24].

Misturas eutéticas e não eutéticas

As misturas eutéticas e não eutéticas de *PCM's* orgânicos e/ou inorgânicos podem ser utilizadas quando se pretende ajustar a temperatura de fusão e capacidade de armazenamento térmico [25]. Através do controlo da mistura é possível conceber *PCM's* cuja temperatura de fusão e densidade volumétrica de armazenamento térmico não é alcançável com nenhum dos *PCM's* constituintes da mistura autonomamente [13]. As misturas eutéticas são misturas de dois ou mais materiais, que liquidificam e solidificam de forma congruente, em simultâneo e sem segregação.

Na Tabela 3.3 são expostas características térmicas de misturas adequadas à aplicação no interior de edifícios.

Tabela 3.3: Características térmicas de misturas eutéticas, adaptado de [25].

Mistura eutética	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia de fusão [KJ/Kg]
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [66/33]	25	127
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} + \text{KCl} + \text{H}_2\text{O}$ [48/4,3/0,4/47,3]	27	188
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH} + \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ [45/55]	21	143
$\text{CH}_3\text{CONH}_2 + \text{NH}_2\text{CONH}_2$ [50/50]	27	263
$\text{Cl}_4\text{H}_2 \cdot 8\text{O}_2 + \text{C}_{10}\text{H}_2\text{O} \cdot \text{O}_2$ [34/66]	24	148
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [45/55]	25	130

Os *PCM's* comercializados são sobretudo sais hidratados, parafinas ou misturas eutéticas de água-sal. Normalmente na composição de *PCM's* comerciais verifica-se a presença de nucleador e o material encontra-se gelificado. Os *PCM's* disponíveis no mercado cobrem uma gama de temperaturas entre -40° e 120°C .

3.1.4 Incorporação de *PCM's* em materiais de construção

A incorporação de *PCM's* em *TESS* pode ser feita por impregnação direta, imersão, encapsulamento ou aplicação em filme [21]. A impregnação direta é método mais simples de aplicação de *PCM's*. O *PCM* é adicionado no estado líquido (solução aquosa) ou sólido (pó) diretamente ao material de construção. Esta técnica de aplicação resulta frequentemente em problemas de compatibilidade. A imersão de materiais de construção em suspensões aquosas de *PCM's* é outra técnica de aplicação vulgarmente utilizada [26]. Os materiais absorvem a suspensão aquosa, sofrendo posteriormente um processo de secagem. Desta forma a água abandona o material, ficando apenas retido no interior da sua estrutura porosa o *PCM* sólido. Esta técnica de aplicação é um processo moroso apresentando ainda a possibilidade de ocorrência de vazamentos de *PCM's* durante os ciclos de aquecimento e arrefecimento. O confinamento através do encapsulamento dos *PCM's* pretende evitar a contaminação do material envolvente e reduzir o risco de fugas que reduzam a eficácia do sistema. As técnicas de confinamento diferem quanto à ordem

de grandeza da cápsula e do material confinado, podendo existir micro e macroencapsulamento [11]. Em ambos os casos a cápsula ou invólucro deverá ter características como resistência mecânica e deformabilidade suficiente que lhe permita resistir a solicitações externas como as existentes no processo de amassadura das argamassas e acomodar as mudanças de forma e volume do próprio *PCM* sem comprometer a sua estanquidade. A cápsula deverá ainda ser resistente à corrosão e possibilitar uma transferência de calor eficiente.

Macroencapsulamento

O macroencapsulamento é uma solução técnica que confina os *PCM's* dentro de bolsas (Figura 3.5), tubos, esferas ou painéis de volume variável (desde mililitros a litros). Esta solução pode ser incorporada diretamente em produtos de construção, apresentando porém baixo coeficiente de transferência térmica, uma vez que as estruturas onde os *PCM's* se encontram contidos funcionam como obstáculos à transferência de calor entre o *PCM* e o meio ambiente. O macroencapsulamento requer uma aplicação cuidadosa nos sistemas construtivos, aumentando significativamente o custo desta solução técnica. No entanto, esta técnica de aplicação de *PCM's* apresenta vantagens importantes ao nível da redução da ocorrência de separação de fases [19].



Figura 3.5: Macroencapsulamento em bolsas [19].

Microencapsulamento

Esta solução técnica confina *PCM's* em microcápsulas (Figura 3.6) com diâmetro entre 1 e 100 μm , sendo usual a utilização de *PCM's* em estado sólido (pó) ou líquido (suspensão aquosa) [27]. O microencapsulamento permite reduzir o risco de fugas e emissão de odores. Na preparação das cápsulas ou invólucros são geralmente utilizados polímeros de elevada massa volúmica sendo o mais referenciado na literatura o polimetilmetacrilato (*Polymethyl methacrylate*, *PMMA*) [28].

O arranjo espacial do *PCM* no interior das microcápsulas é exequível de diferentes formas (Figura 3.7), não alterando a interação deste com os restantes materiais presentes nos *TESS* onde se pretenda incorporar o *PCM* [13]. Sucintamente, o arranjo espacial no interior das microcápsulas não influencia a compatibilidade entre o filme de encapsulamento e os materiais de construção circundantes [11].

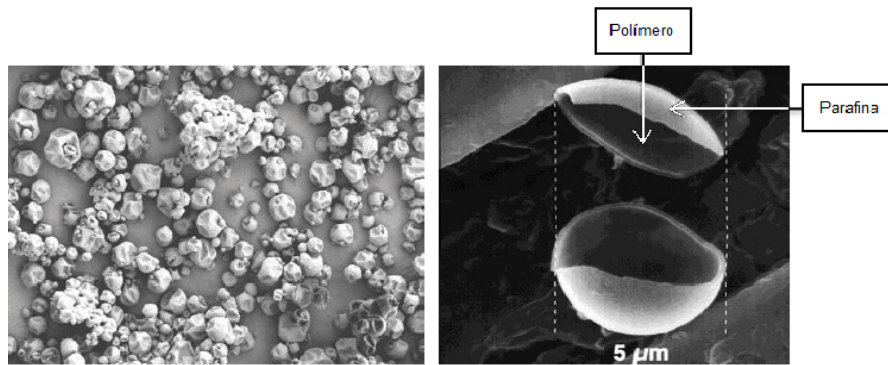


Figura 3.6: Exemplo de microencapsulamento, adaptado de [27].

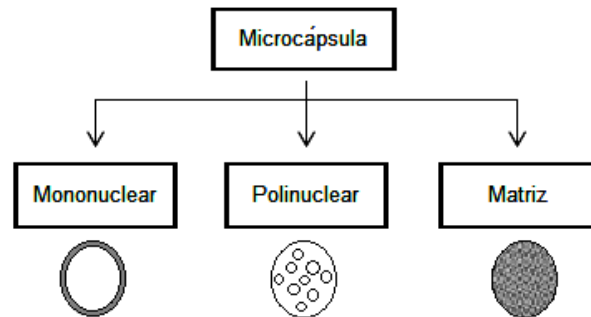


Figura 3.7: Possíveis arranjos espaciais no interior de uma microcápsula [13].

Castellón *et al.* [29] recomenda a utilização de cápsulas ou invólucros constituídos por polímeros semicristalinos em virtude da sua maior resistência à fissuração causada por tensões induzidas pela ação de agentes ambientais (*Environmental Stress Cracking, ESC*). O *ESC* é uma das principais causas de fugas em cápsulas de origem polimérica, comprometendo os sistemas de armazenamento térmico [29].

O microencapsulamento de ceras de parafinas é correntemente utilizado em *TESS* pois não apresenta riscos ambientais ou para saúde pública. Observa-se ainda elevada compatibilidade com os restantes materiais de construção sem comprometimento das suas características físicas. A elevada área superficial aumenta a capacidade de transferência de calor das ceras de parafina. Uddin *et al.* [30] e Sharma *et al.* [20] demonstraram a capacidade cíclica das ceras de parafinas manterem o seu perfil geométrico e acumulação térmica. A manutenção cíclica da eficiência das ceras de parafina é quase total, denotando-se apenas uma mínima variação de temperatura de transição após 1000 ciclos (Figura 3.8).

Diferentes métodos têm sido usados para efetuar o microencapsulamento de *PCM's*, contudo a polimerização *in situ* parece obter consensualidade relativamente às suas vantagens.

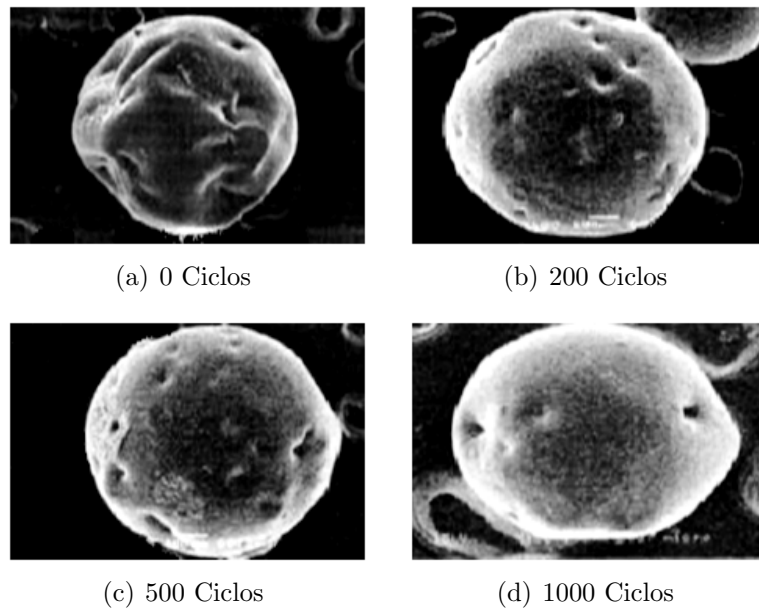


Figura 3.8: Geometria de parafina microencapsulada avaliada por SEM após submetida a diferente número de ciclos térmicos, adaptado de [30].

3.1.5 Problemas técnicos na aplicação de *PCM's*

Na aplicação de *PCM's* podem surgir alguns problemas técnicos sendo os mais recorrentes a separação de fases, o superarrefecimento e a redução da resistência ao fogo dos elementos onde o *PCM* se encontra incorporado. Em misturas não eutéticas podem existir temperaturas distintas de mudança de fase, o que potencia a sua separação ou decomposição. A mistura inicial deixa então de existir, alterando-se as propriedades de transição de fase. Torna-se necessário encontrar o ponto eutético, ou seja o ponto em que a percentagem de cada componente é tal que a mudança de fase ocorre em simultâneo, mantendo as características da mistura inicial independentemente do número de ciclos.

O superarrefecimento é um fenómeno que se verifica-se em determinados *PCM's* em que este não solidifica imediatamente abaixo da temperatura de fusão, cristalizando apenas. Quando ocorre o superarrefecimento a libertação de calor latente só se verifica caso a temperatura baixe bastante para além da temperatura de transição de fase [31]. Em *PCM's* de origem inorgânica é frequente não existir qualquer libertação de calor, sendo necessário usar aditivos específicos para que a transferência de calor se efetive. No caso de *PCM's* orgânicos, sobretudo nas ceras de parafinas, o fenómeno do superarrefecimento não se verifica.

No entanto, a utilização de ceras de parafina em *TESS* acarreta riscos de inflamabilidade. Esta especificidade afeta a resistência ao fogo dos elementos onde se incorporam ceras de parafina, restringindo a sua utilização em edifícios [32]. Diversos autores testaram laboratorialmente com sucesso a introdução de retardadores de chama e produtos autoextinguíveis [33, 34, 35].

3.2 Materiais com propriedades fotocatalíticas

O grau de salubridade do ar interior dos edifícios depende de inúmeros fatores entre os quais emissões de compostos orgânicos com origem nos próprios materiais utilizados na construção. O desenvolvimento de argamassas que possuam a capacidade de degradar poluentes presentes no ar, transformando-os em substâncias inofensivas para a saúde humana, contribuirá para que os índices de qualidade do ar interior melhorem significativamente sem recurso a sistemas de renovação e tratamento de ar [2, 36]. Os compostos orgânicos voláteis (COV) são libertados por materiais sintéticos usados em acabamentos nomeadamente tintas, vernizes e solventes. A concentração destes compostos no interior dos edifícios e o elevado tempo de exposição dos seres humanos a estes agentes tóxicos e carcinogénicos, é atualmente considerado um problema de saúde pública [37]. A melhoria da qualidade do ar interior (QAI) tem por isso atraído especial atenção de diversos ramos da comunidade científica. Também nos edifícios a presença de NO_2 e NO_x tem repercussão, diminuindo o seu tempo de vida útil, causando e acelerando processos de degradação [38]. A radiação UV solar confere aos fotocatalisadores energia suficiente para que estes produzam espécies com forte poder de oxidação e redução capazes de mineralizar compostos tanto orgânicos como inorgânicos [39]. Inúmeros produtos à base de TiO_2 já se encontram em fase de comercialização (azulejos revestidos por filme ou folhas contendo TiO_2 , vidros, papéis, cortinas entre outros), oferecendo soluções passivas para melhoria da qualidade do ar interior. É contudo, ainda necessário desenvolver produtos que garantam a manutenção dos níveis de fotodegradação em ambientes internos onde apenas se verifica a existência de radiação da zona visível do espectro. A redução do ângulo de atrito interno da água através de processos fotocatalíticos permite ainda a manutenção das características estéticas destes produtos, tornando-os autolimpantes [37].

3.2.1 Materiais nanométricos

A diminuta granulometria e a elevada área superficial dos nanomateriais modifica o seu comportamento, alterando características fundamentais mantendo inalterada a sua composição. A alteração das características dos materiais torna possível o ajuste de propriedades como a absorção ótica, o ponto de fusão, a atividade catalítica e a condutividade térmica, elétrica e magnética [40].

A discussão sobre a possibilidade de ajustar as propriedades dos materiais construindo-os átomo a átomo teve início na década de 50, sendo encarando o setor da construção como uma das principais áreas onde a investigação e aplicação de nanotecnologia seria exequível. Posteriormente a aplicação da nanotecnologia ao setor da construção atravessou um período de estagnação e hegemonia para setores tradicionalmente mais vanguardistas como a saúde, a eletrónica, o setor energético, entre outros. Recentemente o interesse do setor em desenvolver produtos de maior sustentabilidade, durabilidade e multifuncionalidade reavivou o interesse nas alterações das propriedades dos materiais adjacentes à redução à escala nanométrica

(partículas de dimensão inferiores a 100 nm).

A classe dos óxidos metálicos, tais como a sílica, a titânia, a alumina ou o óxido de ferro integram hoje diversos materiais de construção, conferindo-lhe propriedades funcionais como a autolimpeza, a ação bactericida, a descontaminação de poluentes gasosos, a acumulação de energia, etc. Todavia o setor da construção continua a demonstrar alguma renitência quanto à eficácia, durabilidade, viabilidade económica e segurança desta tecnologia [41].

A introdução de materiais nanométricos em argamassas conferir-lhe-á propriedades que estas tradicionalmente não possuem como capacidade de degradação de poluentes gasosos, propriedades autolimpantes e propriedades bactericidas, não interferindo todavia com a compatibilidade destas com os restantes produtos existentes no setor da construção.

O método de aplicação de nanomateriais em argamassas poderá ocorrer de diferentes formas: (i) imersão, (ii) autoclave, (iii) adição na sua composição ou (iv) aplicação externa em filme [42]. Quando aplicados externamente em filme, as películas deste poderão se degradar após exposição aos elementos, libertando partículas passíveis de ser inaladas e causar enfermidades aos utilizadores destes ambientes. No presente trabalho todos os aditivos foram incorporados no estado sólido durante a amassadura, sendo a possibilidade de libertação de partículas no estado endurecido bastante reduzida [43].

3.2.2 Fotocatálise - Enquadramento e aplicações

Atualmente o uso processos avançados de oxidação (*AOP*) na descontaminação ambiental é prática recorrente. Estes processos induzem alterações físico-químicas profundas na estrutura dos poluentes.

Os radicais hidróxilo (HO^*) e os iões superóxidos (O_2^-) gerados por fotocatálise possuem um elevado poder oxidante, capazes de provocar a dissociação de compostos orgânicos e inorgânicos e dessa forma promover a sua desintegração. A ação de largo espectro dos radicais hidróxilo relativamente a diferentes contaminantes constitui o processo fotocatalítico do TiO_2 como uma técnica eficaz de degradação de poluentes [37].

O estudo do processo fotocatalítico remonta à década de 30 do século passado, tendo origem no desgaste de tintas onde rutilo (uma das fases cristalinas de dióxido de titânio) era vulgarmente usado como pigmento. A investigação nesta área foi despoletada pela necessidade de compreender a origem do desgaste sofrido por este tipo de tintas quando expostas a radiação solar. Compreendeu-se que a degradação de um composto orgânico presente na composição das tintas (através da destruição das suas ligações) exponha o rutilo na camada superficial sob a forma de pó branco, sendo este fenómeno posteriormente designado por "*chalk effect*" [44, 45]. A investigação sobre os processos de fotocatálise focou-se então essencialmente na utilização de óxido de zinco como semicondutor, esclarecendo-se a natureza e os mecanismos das reações de oxidação e redução envolvidas [46].

Na década de 70 investigadores como Fujishima e Honda retomaram o interesse

sobre as propriedades fotocatalíticas do TiO_2 nas suas diferentes formas cristalinas estudando a fotólise eletroquímica da água [47]. Desde então, o potencial dos processos fotocatalíticos envolvendo a oxidação de água e mineralização de diversos iões orgânicos e inorgânicos tem sido intensamente explorada utilizando inúmeros catalisadores. A possibilidade de descontaminação através dos processos de fotocatálise foi também estudada por Pruden e Ollis [48, 49] que demonstraram a mineralização total de clorofórmio e tricloroetileno durante a iluminação de TiO_2 .

A utilização de processos de fotocatálise para purificação de ar e água tornou-se uma prática recorrente, estendendo-se a sua aplicabilidade à obtenção de superfícies com capacidade de autolimpeza, autoesterilização e antiembaciamento [50, 44]. O dióxido de titânio destaca-se como fotocatalisador de eleição uma vez que apresenta um elevado poder oxidante, baixo custo relativo, capacidade de utilização prolongada sem perda substancial de atividade, fotoestabilidade, não-toxicidade e insolubilidade sob a maioria das condições, espectros de absorção largos e com elevados coeficientes de absorção, elevada eficiência fotocatalítica particularmente na escala manométrica e a possibilidade de ajuste das suas propriedades através de dopagem, sensibilizadores, etc [51]. Estas características tornam os óxidos de titânio materiais muito apelativos para aplicações ambientais, particularmente na degradação de poluentes orgânicos.

Além de aplicações no setor da construção como tintas, telhas cerâmicas, argamassas e betões, a utilização de TiO_2 prolifera em diversas áreas como (i) a indústria automóvel (espelhos), (ii) a agricultura, (iii) a medicina (autoesterilização e tratamento de cancro), (iv) a geração de energia (células fotovoltaicas) e (v) a purificação de água.

3.2.3 Descrição do processo fotocatalítico

O TiO_2 é um composto presente na natureza sob três fases cristalinas: (i) anatase, (ii) rutilo e (iii) brookite. A nível estrutural quer a anatase quer o rutilo apresentam uma geometria tetragonal, enquanto a brookite é caracterizada por uma geometria ortorrômbica. A brookite e a anatase são fases metaestáveis que sujeitas a tratamento térmico são irreversivelmente convertidas em rutilo, termodinamicamente mais estável [44]. Dependendo do tamanho do cristalito e do teor de impurezas, a transformação de anatase em rutilo ocorre numa gama de temperaturas entre os 700 e 1000°C. Todavia na sua forma cristalina pura de rutilo o TiO_2 não atua como agente de fotodegradação de compostos orgânicos [52].

O fabrico de brookite à escala nanométrica, tornando-a passível de ser incorporada em diversas aplicações, é tecnicamente exigente sem que disso resultem significativos aumentos da atividade fotocatalítica. Deste modo, as suas potenciais aplicações não se encontram totalmente exploradas [53]. O maior número de grupos hidróxilos gerados, a energia da banda de transição e a superior área específica conferem uma elevada atividade fotocatalítica à anatase que, juntamente com a facilidade de produção, faz com que esta seja utilizada em inúmeras aplicações comerciais no campo da descontaminação de poluentes [42].

Os processos fotocatalíticos são uma reação fotoquímica onde ocorre a absorção de um fóton. Os fotocatalisadores são capazes converter energia de fótons irradiados em energia química. Este processo pode ser de dois tipos distintos: (i) homogêneo, quando o fotocatalisador se encontra na fase líquida e (ii) heterogêneo, quando o catalisador se encontra numa fase distinta da solução aquosa, geralmente sistemas líquido-sólido.

A fotocatalise heterogênea envolve a ativação de um semicondutor e inicia-se quando, por irradiação de fótons com comprimento de onda suficiente para excitar os elétrons da banda de valência (BV), resulta a promoção de um elétron para a banda de condução (BC) com a geração de uma lacuna (h^+) na banda de valência. As lacunas criadas possuem elevado poder oxidante enquanto que os elétrons apresentam elevado poder redutor (Figura 3.9). A zona de transição entre a banda de valência e a banda de condução é denominada de "bandgap" [52].

A Tabela 3.4 apresenta materiais vulgarmente utilizados como semicondutores e respetivos valores de energia de transição e comprimento de onda [54].

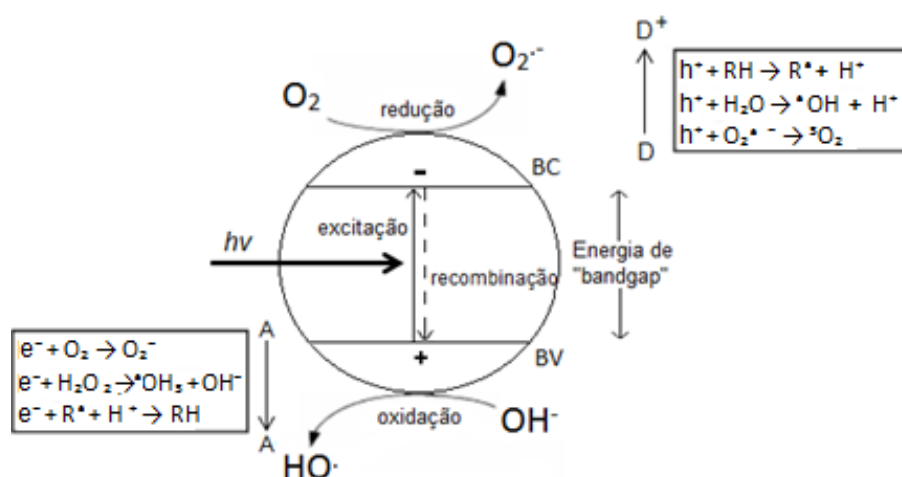
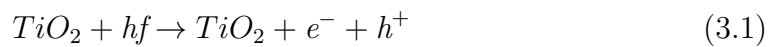


Figura 3.9: Esquema representativo das fases envolvidas no processo de fotocatalise, adaptado de [52].

Tabela 3.4: Semicondutores comuns em processos fotocatalíticos e respetivas posições da banda de transição em solução aquosa de pH 1 [54].

Semicondutor	Banda de transição [eV]	Comprimento de onda da banda de transição [nm]
TiO_2 (Anatase)	3,5	388
TiO_2 (Rutilo)	3,0	413
SnO_2	3,9	318
ZnO	3,2	390
CdS	2,5	497

As lacunas originadas por reações fotocatalíticas utilizando TiO_2 como semicondutor apresentam potenciais bastante positivos, +3,0 eV (rutilo) e +3,5 eV (anatase) sendo suficientes para gerar, quando submetidas a radiação com comprimento de onda inferior a 413 e 388 nm respetivamente, radicais hidróxilos (HO^*) e radicais aniônicos de superóxido ($O_2^{\bullet-}$). Os radicais gerados reagem com as moléculas de H_2O absorvidas da superfície das partículas do semicondutor atuando como agentes descontaminantes de microrganismos (orgânicos e inorgânicos) [44]. A energia necessária, ou seja a radiação eletromagnética, corresponde ao produto da constante de Planck pela frequência da radiação incidente ($E = hf$). Seguidamente representa-se esquematicamente as reações envolvidas.



A reações dos radicais livres conduzem à mineralização de moléculas orgânicas em dióxido de carbono e água. Os produtos da reação depositam-se sob a superfície sendo facilmente removidos caso a superfície se encontre exposta à ação da chuva e do vento.

A eficiência do processo de fotocatalise depende da relação entre o processo de remoção dos eletrões da superfície do semicondutor e a ocorrência de recombinação do par eletrão/lacuna, independentemente do tempo de exposição e concentração do poluente [52, 42]. Em sistemas heterogêneos o processo de recombinação eletrão/lacuna é obstáculo à obtenção de elevada eficiência fotocatalítica.

As características geométricas do semicondutor, ou seja a granulometria das suas partículas e a sua área superficial, as características estruturais e a própria cinética do processo fotocatalítico influenciam a probabilidade de ocorrência de recombinação do par eletrão/lacuna [55]. Para avaliar o desempenho de materiais com agentes fotocatalíticos na sua constituição (ou aplicado em filme) na remoção de NO , a *International Organization for Standardization* publicou a *ISO 22197-1* de 2007 tendo por base a norma japonesa *Japanese Industrial Standards JIS R-1701-1* de 2004, não sendo contudo estes documentos aplicáveis a processos de fotodegradação utilizando TiO_2 na sua formula granular ou em pó.

Na literatura encontram-se diversas metodologias de teste não havendo uniformidade de procedimentos; contudo todas as metodologias ponderam parâmetros como a natureza do catalisador, a sua granulometria, a humidade, a intensidade da radiação, a temperatura, o tipo e concentração de poluente. De um modo geral pode-se dividir as metodologias de teste em três tipologias distintas [56].

- Testes colorimétricos com corantes
- Testes de despoluição com gases inorgânicos
- Testes de degradação de compostos orgânicos e aromáticos (COV, formaldeído)

3.2.4 Fatores influenciadores do processo fotocatalítico

A eficiência da degradação de poluentes gasosos em ambientes interiores através de processos fotocatalíticos não é apenas afetada pela natureza do semicondutor utilizado. As condições operativas desempenham um papel fulcral no rendimento do processo tendo vital importância parâmetros como: (i) a intensidade de irradiação e condições de iluminação, podendo ser natural ou artificial desde que o comprimento de onda não seja inferior ao comprimento de onda da banda de transição [57, 58]; (ii) a temperatura, com melhores resultados registados entre os 20 e 80°C [37, 59, 60]; e a(iii) humidade relativa que não deverá ultrapassar 50% [37, 59, 61].

A utilização de óxido de titânio apresenta duas restrições que limitam eficiência do processo: (i) o baixo rendimento fotónico devido à recombinação eletrão/lacuna e (ii) o gradiente energético de aproximadamente 3,2 eV, requerendo assim excitação na região do UV para ativação do processo, o que corresponde a menos de 5% da intensidade total da radiação solar [62].

A acumulação excessiva dos produtos na superfície do TiO_2 oriundos da mineralização de poluentes gasosos ou a diminuição considerável da área superficial do radicais HO^* pode inativar o processo fotocatalítico. Para garantir a continuidade do processo de catálise ou a sua reativação, é necessário a manutenção/aumento dos locais ativos na superfície do TiO_2 ou a regeneração dos radicais HO^* . A regeneração fotocatalítica em sistemas de melhoria do ar interior é usualmente feita através do uso simultâneo de irradiação UV e exposição a humidade, promovendo a hidrofília e limpeza da superfície como em 3.2.6 se demonstrará. Técnicas de reativação como o tratamento térmico ou lavagem com soluções alcalinas não são aplicáveis a sistemas de melhoria de qualidade do ar interior devido as suas especificidades apesar de apresentarem resultados consideráveis num espaço temporal reduzido [37, 63, 64].

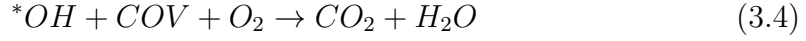
Se a quantidade de catalisador ou a sua área de exposição for demasiado elevada ocorre a recombinação eletrão/lacuna, com diminuição da eficiência do processo. O mesmo acontece se o tamanho das partículas do catalisador for demasiadamente reduzido [64, 51, 65].

Além da natureza do semicondutor e das condições operativas também as propriedades da superfície e a presença de imperfeições (fases amorfas não reativas) e impurezas iónicas desempenham um papel preponderante no processo catalítico aumentando a probabilidade de recombinação [42].

3.2.5 Degradação de poluentes do ar interior

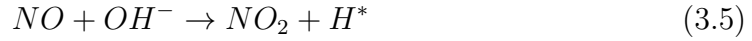
Os COV's são amplamente usados na aferição da capacidade de resposta de fotocatalisadores devido à sua vulgaridade em situações comuns e de relativa perigosidade para a saúde pública. A capacidade de desodorização constitui outro dos benefícios da aplicação de aditivos fotocatalíticos, possibilitando metodologias de teste de degradação de compostos orgânicos usando COV's a sua verificação.

Das reações dos radicais formados pela fotoactivação de aditivos fotocatalíticos com COV's resultam produtos de reacção neutros (CO_2 e H_2O) [66].



O CO_2 produzido poderá incrementar processos de carbonatação nos ligantes aéreos eventualmente existentes, promovendo a formação de carbonatos na camada superficial das argamassas. A formação destes carbonatos, não só altera as características da argamassa como poderá influenciar os resultados quanto à capacidade de degradação de poluentes [67].

No presente trabalho testou-se NO_x como gás poluente, procedimento habitualmente descrito na literatura como alternativa ao uso de COV's. Sucintamente descreve-se as reacções envolvidas no processo de oxidação do NO_x por fotocatalise, ocorrendo a formação de NO_2 e HNO_3 .



A eficiência (η) do processo de degradação fotocatalítica de poluentes gasosos pode ser expressa pela relação entre a concentração de poluente inicial ($C_{inicial}$) e final (C_{final}) segundo a expressão:

$$\eta = \frac{C_{final} - C_{inicial}}{C_{inicial}} \times 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

3.2.6 Capacidade autolimpante e autoesterilizante

A hidrofília fotoinduzida é outro fenómeno que ocorre na superfície do TiO_2 quando sujeita a irradiação UV. A super-hidrofília da superfície deve-se à redução do ângulo de contacto entre a água e a superfície (em alguns casos até 80%) tornando-a hidrofílica. A remoção de parte dos átomos de O_2 da superfície durante os mecanismos de reacção fotocatalítica reduz a tensão interfacial entre as gotas de água e a superfície para valores significativamente inferiores à tensão interfacial entre o ar e essa mesma superfície. Tal facto, origina a formação de uma fina camada de água sobre a superfície quando esta se encontra irradiada. As gotas de água tendem a escoar rapidamente resultando numa secagem rápida da superfície. Tais materiais possuem ainda a especificidade de não embaciarem característica de superfícies com ângulos de contacto superior a 20° [37]. Este fenómeno é reversível, deixando de se verificar na ausência de irradiação UV ou O_2 . A Figura 3.10 mostra o efeito da radiação UV em superfícies hidrófilas [68, 69].

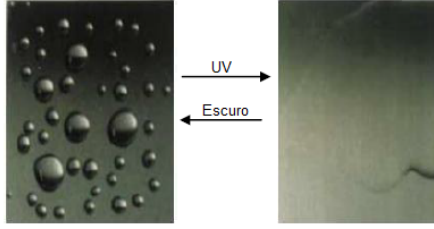


Figura 3.10: Comportamento hidrófilo de superfície com e sem irradiação UV [68].

A lavagem dos produtos mineralizados gerados durante as reações de oxidação, assim como a impossibilidade de fixação na superfície de compostos orgânicos e inorgânicos contribui para a manutenção das características estéticas dos materiais de construção durante o seu período de vida, refletindo-se na diminuição dos custos operacionais dos edifícios. Para aumentar a eficácia do processo fotocatalítico caso o revestimento das superfícies seja feito com filmes de TiO_2 , estes devem ter uma espessura considerável, tipicamente superior a $1\ \mu m$. Espessuras inferiores a $1\ \mu m$ apresentam uma baixa absorvância na região de irradiação com comprimento de onda entre 320 e 380 nm. Os revestimentos de TiO_2 devem ainda exibir clareza e suficiente robustez mecânica.

É de referir ainda a distinção entre os dois fenómenos fotoinduzidos que o TiO_2 desenvolve simultaneamente, existindo óxidos com capacidade fotocatalítica mas que não se tornam hidrófilos quando iluminados por radiação UV. Dependendo das condições de processamento e da sua composição, a superfície do TiO_2 poderá apresentar maior ou menor comportamento hidrófilo.

A incorporação de TiO_2 em argamassas de revestimento permitirá a obtenção de um revestimento com características autolimpantes e autoesterilizantes. A capacidade autolimpante de argamassas é usualmente aferida recorrendo a testes colorimétricos e à medição do ângulo contacto da superfície. No presente trabalho não foram aferidas eventuais alterações do ângulo de contacto sendo apenas preconizados testes colorimétricos. Em testes colorimétricos as amostras são contaminadas com Rodamina B (*RhB*) ou azul de metileno, duas substâncias corantes não-tóxicas e degradáveis na presença de um fotocatalisador irradiado. A avaliação da taxa de degradação realiza-se quantificando a taxa de descoloração. A *RhB* contém antraceno, um hidrocarboneto aromático policíclico (PAH) responsável pelo desenvolvimento de sujidade em edifícios, simulando-se assim condições de contaminação existentes em edifícios sujeitos a poluição atmosférica [70]. O elevado poder corante da *RhB*, juntamente com a sua não sensibilidade a meios alcalinos, possibilita a sua utilização em argamassas cimentícias e mistas [56].

A taxa de degradação é expressa segundo:

$$C_a^* = \frac{a_i^* - a_f^*}{a_i^*} \times 100 \quad [\%] \quad (3.9)$$

Representando a_i^* e a_f^* o valor inicial e final de um determinado parâmetro colorimétrico, no caso a coordenada a^* do sistema de medição Lab* [CiELab] [71].

Contudo, autores como Cassar *et al.* [72] afirmam que corantes como a *RhB* e o azul de metileno se degradam inclusive na ausência de um catalisador foto-activado, o que poderá comprometer a veracidade e exatidão dos resultados. A determinação da concentração de compostos orgânicos, antes e após a irradiação do material numa atmosfera controlada, será uma forma de corroborar a sua eficaz ação autolimpante.

3.3 Materiais para modelação higroscópica

3.3.1 Agentes porogéneos e superabsorventes

A variação dos valores de humidade relativa em ambientes interiores tem consequências nefastas tanto para a saúde e bem estar dos seus ocupantes como para o edificado, reduzindo a durabilidade das estruturas com o surgimento de diversas patologias.

O desenvolvimento de soluções construtivas recorrendo à incorporação de agentes superabsorventes e porogéneos com elevada capacidade higroscópica, possibilitará a redução do gradiente de teores de humidade relativa verificada no interior das habitações, sem que tal se traduza num acréscimo dos custos operacionais associados.

A estrutura interna porosa interligada das argamassas permite-lhes a absorção isotérmica e libertação de humidade quando expostas a variações de humidade relativa, atuando como agentes ativos na modelação higroscópica em ambientes interiores [73]. A introdução de agentes superabsorventes e porogéneos com elevada capacidade higroscópica potenciará o impacto positivo das argamassas na estabilização dos valores de humidade relativa em ambientes interiores.

3.3.2 Transferência de humidade em materiais porosos

As variações do teor de humidade relativa no interior dos edifícios podem ter duas naturezas distintas, estando a sua origem relacionada com variações diárias e sazonais das condições climáticas a que um edifício está sujeito ou à criação de microclimas no seu interior. Pontes térmicas e zonas de pouca ventilação (casas de banho, zonas cobertas por mobiliário, etc) originam climas singulares, distintos da sua envolvente, denominados de microclimas.

Os microclimas possuem teores de humidade relativa significativamente diferentes da envolvente, originando patologias tais como a deterioração de elementos em madeira, descargas eletrostáticas e o surgimento de bolores e fungos, podendo suscitar problemas a nível respiratório, alergias e irritações de pele e olhos aos ocupantes destes espaços [74].

O teor de humidade relativa no interior de um edifício resulta da conjugação de diversos fatores nomeadamente: (i) o clima exterior, (ii) a ventilação do edifício, (iii) a temperatura exterior e interior, (iv) a capacidade higroscópica dos materiais de construção e (v) a existência de fontes de humidade no seu interior [75].

Uma correta ventilação permite regularizar o teor de humidade relativa no interior dos edifícios, eliminando simultaneamente micro-organismos e odores [74]. A ventilação do espaço interior poderá, em determinadas circunstâncias, revelar-se insuficiente para colmatar as variações diárias e sazonais do teor de humidade. O desenvolvimento de materiais de construção com estruturas de maior porosidade e capacidade higroscópica poderá contribuir para suprimir tal deficiência.

Os materiais de construção têm a capacidade de fixar humidade na sua estrutura mediante três processos físicos distintos: (i) adsorvendo vapor de água presente no ar; (ii) por capilaridade quando em contacto com água em fase líquida; ou (iii) por condensação no interior da estrutura quando esta atinge o ponto de saturação. Quantitativamente, a fixação de água está correlacionada com diversos fatores. A natureza e forma do material, a dimensão e interligação dos seus poros e as condições a que se encontra exposto (condições termodinâmicas e taxa de ventilação) desempenham um papel fulcral na sua capacidade higroscópica [76].

3.3.3 Higroscopicidade dos materiais porosos

A estrutura porosa dos materiais de construção possibilita-lhes adsorver vapor de água sendo responsáveis por este fenómeno as forças intermoleculares existentes na interface sólido-líquido, denominadas de forças de Van der Waals.

Materiais com maior volume de poros e tamanho médio poro menor possuem maior capacidade higroscópica dada a superior área de interface sólido-líquido. Uma maior interface sólido-líquido traduz-se no aumento das forças intermoleculares existentes conferindo aos materiais uma maior capacidade de absorção isotérmica e restituição de humidade à envolvente.

A variação da quantidade de água retida no interior da estrutura dos materiais pode ir da total inexistência de água até à saturação do material, sendo usual a subdivisão dos materiais em três tipologias distintas: (i) materiais não-higroscópicos, (ii) materiais higroscópicos e (iii) materiais super-higroscópicos.

Os materiais não-higroscópicos são aqueles que mantêm a sua massa aproximadamente constante quando o meio onde estão inseridos sofre variações de humidade relativa, ou seja, não possuem a capacidade de reter ou libertar água.

A gama de valores referentes à humidade relativa dos materiais classificados como higroscópicos situa-se entre 0% a 95% (em casos pontuais até 98%), onde as moléculas de água são absorvidas na superfície porosa de forma sucessiva, formando diversas camadas moleculares. A absorção de moléculas de água prolonga-se até que se atinja o teor de humidade de equilíbrio (condições termodinâmicas estáveis). Nos materiais higroscópicos o transporte em fase gasosa assume um papel preponderante sobre o transporte em fase líquida.

Nos materiais super-higroscópicos, o teor de humidade relativa situa-se entre 95% e o ponto de saturação. A absorção continua de água forma fases líquidas contínuas na superfície porosa originando condensações capilares. Inversamente ao verificado nos materiais higroscópicos, o transporte ocorre essencialmente na fase líquida. O teor de humidade e humidade relativa sofrem um acentuado acréscimo

quando a absorção isotérmica se inicia, sendo esse ponto definido como a transição entre materiais higroscópicos e super-higroscópicos (Figura 3.11) [77].

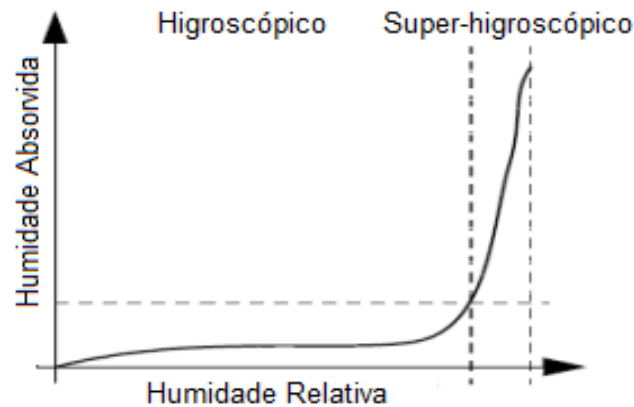
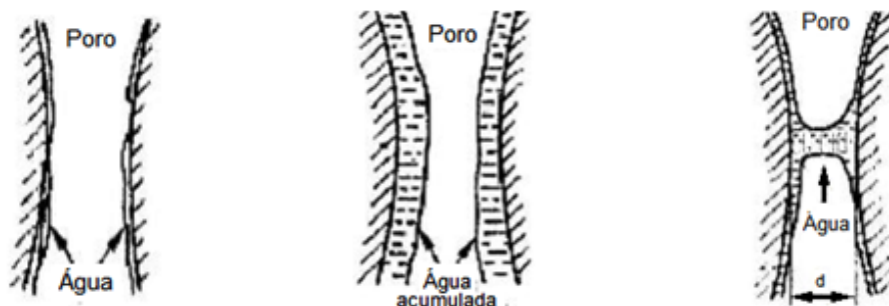


Figura 3.11: Higroscopicidade dos materiais porosos em função da humidade relativa do meio [77].

3.3.4 Absorção e dessorção de humidade

O processo de absorção de moléculas de água ocorre em três fases distintas: (i) absorção monomolecular, (ii) absorção plurimolecular e (iii) condensação capilar.

Quando os materiais se encontram sujeitos a baixas pressões parciais de vapor de água ocorre a fixação de moléculas de água, formando-se uma primeira camada monomolecular de água sobre a superfície dos poros. Com o aumento da pressão parcial, formam-se sucessivas camadas moleculares de água na superfície dos poros. A subida da pressão parcial de vapor de água para valores próximos da pressão de saturação em materiais com reduzido diâmetro de poros (2 a 20nm) gera gotículas de água resultantes da conexão entre camadas plurimoleculares (Figura 3.12) [78].



(a) Absorção monomolecular (b) Absorção plurimolecular (c) Condensação capilar

Figura 3.12: Etapas de fixação de humidade do interior dos poros [78].

A capacidade higroscópica de um determinado material é a diferença entre o teor de humidade necessário para a formação da camada monomolecular na

superfície dos poros e o teor de humidade que causa a condensação de água nessa mesma superfície, traduzindo a quantidade máxima de humidade que o material consegue reter.

Através de curvas de absorção isotérmica (Figura 3.13 a) é possível quantificar a referida diferença de humidade em função da pressão de vapor ou da humidade relativa (Figura 3.13 b) [78].

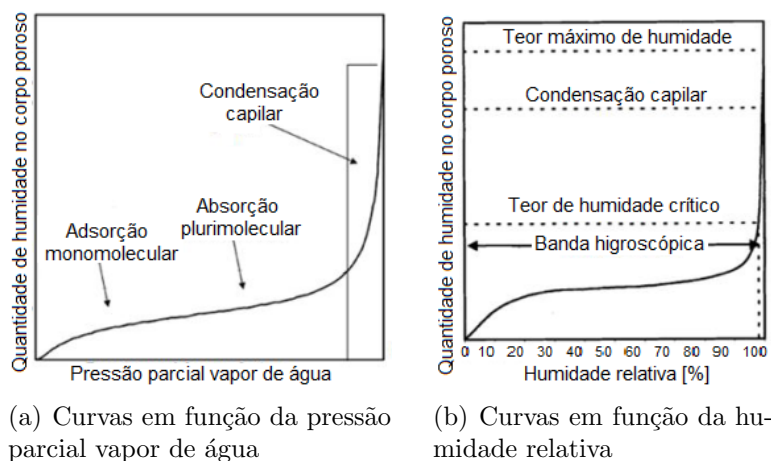


Figura 3.13: Curvas de absorção isotérmica [78].

A banda de higroscopicidade variará consoante os teores de humidade a que o material se encontra exposto, podendo oscilar entre o teor crítico de humidade e o zero, caso o material se encontre num ambiente com teor de humidade nulo.

O teor máximo de humidade corresponde ao valor de humidade relativa no qual todo o volume de vazios no interior da estrutura do material fica preenchido por vapor de água, sendo o volume absorvida igual à porosidade aberta do material. Na prática o teor de humidade máximo é apenas um parâmetro teórico dificilmente verificado dada à existência de ar retido no interior do material, sendo então necessário definir o teor de humidade de condensação capilar, correspondendo à quantidade de humidade absorvida pelo material quando exposto a elevados teores de humidade relativa [78].

3.3.5 Histerese

O comportamento dos materiais higroscópicos é caracterizado por uma curva de dessorção superior à curva de absorção, ou seja, o processo de absorção é mais rápido que a dessorção, gerando histerese comportamental (Figura 3.14). Este fenómeno tem origem na geometria dos poros sendo esta mais favorável ao processo de absorção do que à dessorção. Na literatura é recorrente o uso exclusivo da curva de absorção para caracterizar a banda de higroscopicidade de um determinado material, determinando o declive da curva de absorção (ξ) na região de humidade relativa de interesse [73].

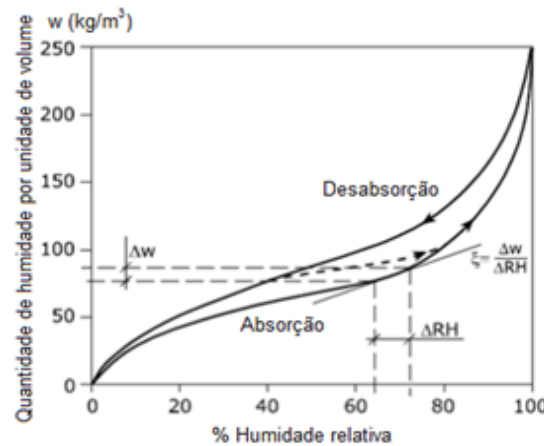


Figura 3.14: Histerese das curvas de absorção e dessorção [73].

3.3.6 Avaliação do controlo de humidade

Para avaliar a capacidade dos materiais de construção na regulação de picos de humidade diários e sazonais uma das metodologias mais usadas é o procedimento desenvolvido na Dinamarca, denominado de método *NordTest*. Este teste consiste na avaliação da quantidade de água transferida do exterior para o interior da estrutura de um material (ou o inverso) durante um determinado período de tempo, submetendo o meio onde este se encontra a variações do teor de humidade [$(Kg/(m^2 \cdot \%HR))$]. A sigla utilizada para a classificação dos materiais é *MBV* (*Moisture Buffer Value*) [79].

Apesar de atualmente já existir a norma *ISO 24353- Hygrothermal performance of buildings and materials* e a *ISO 12571- Hygrothermal performance of buildings and materials-Determination of hygroscopic sorption* publicada no decorrer do presente trabalho, optou-se por aferir a capacidade higroscópica dos materiais segundo a metodologia *Nordtest*. Esta opção prendeu-se com a disponibilidade de comparar os resultados obtidos com a bibliografia existente e com a maior experiência em preconizar tal metodologia. O presente trabalho pretende realizar uma análise comparativa entre a argamassa *Tradical® Décor PF 25* e as novas formulações definidas.

3.3.7 Diferentes níveis de controlo de humidade

Os materiais porosos podem ser competentes na modelação dos teores de humidade interior a três níveis distintos: (i) a nível do compartimento, (ii) do sistema ou (iii) material.

A capacidade de modelação higroscópica dos materiais a nível do compartimento toma em consideração outros elementos presentes no compartimento, como o mobiliário e elementos decorativos, também eles com porosidade na sua estrutura e portanto capacidade de influenciar o teor humidade do compartimento. A taxa de ventilação também é ponderada a este nível. Este tipo de análise tra-

duz o impacto da introdução de um determinado material nos teores de humidade registados no compartimento.

A nível do sistema a análise da capacidade higroscópica dos materiais é avaliada segundo as transferências existentes de humidade entre o material e a sua envolvente, não necessariamente refletida no teor de humidade do compartimento onde o material se encontra. A capacidade de controlo de humidade a nível do sistema reflete a importância relativa do contributo higroscópico do material no compartimento, ponderando a sua área, espessura e taxa de ventilação a que se encontra sujeito.

Por sua vez, a avaliação do controlo de humidade a nível do material despreza as condições climáticas da sua envolvente incidindo a análise na capacidade higroscópica com base na estrutura interna do material. A Figura 3.15 ilustra uma representação esquemática do que acima se descreve [79].

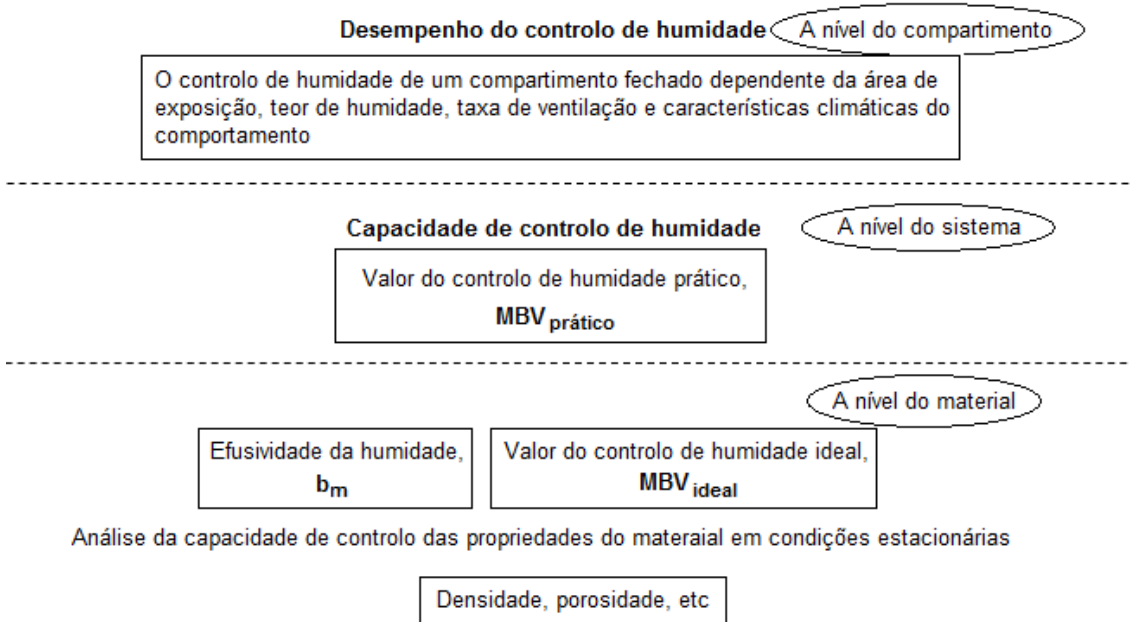


Figura 3.15: Níveis de controlo de humidade num compartimento fechado [79].

Efusividade

A quantificação da humidade absorvida por um material quando sujeito a aumento do valor de humidade à sua superfície é expressa sob a forma $[Kg/(m^2.Pa.s^{1/2})]$, sendo denominada de efusividade da humidade [79].

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \rho_o \frac{\partial \mu}{\partial \phi}}{\rho_s}} \quad (3.10)$$

Onde:

- δ_p -permeabilidade ao vapor de água [$Kg/(m.s.P_a)$]
- ρ_o -densidade do material em seco [Kg/m^3]
- μ -teor de humidade [Kg/Kg]
- ϕ -humidade relativa do meio
- ρ_s -pressão de vapor de saturação [P_a]

O valor da pressão de vapor de saturação depende da metodologia de ensaio adotada, contudo os restantes parâmetros são determinados pela natureza do material. A determinação do valor da efusividade do material é efetuada quando a pressão de vapor de saturação, taxa de ventilação e temperatura se encontram em condições de equilíbrio [79].

MBV ideal

A definição do *MBV ideal* de um determinado material poroso possibilita conhecer a sua capacidade teórica de absorção e libertação de água quando sujeito a variações de humidade relativa. O *MBV ideal* expressa-se em $Kg/(m^2.\%H_R)$, sendo determinado pela seguinte expressão:

$$MBV\ ideal = 0,00568\rho_sb_m\sqrt{t_\eta} \quad (3.11)$$

Onde:

- ρ_s -pressão de vapor de saturação [P_a]
- b_m -valor da efusividade de humidade [$Kg/(m^2.P_a.s^{1/2})$]
- t_η -período, em segundos, em que ocorre libertação/absorção de humidade

O *MBV ideal* está intimamente ligado ao valor de efusividade da humidade permitindo conhecer o valor de *MBV prático* [79].

MBV prático

A obtenção do *MBV prático* [$Kg/(m^2\%HR)$] é feita de modo experimental, representando quantitativamente as permutas de água entre a estrutura porosa do material e envolvente por unidade de área exposta, durante um determinado período de tempo onde se induzem variações de humidade relativa. O ciclo de variação dos teores de humidade relativa é diário, alternando entre 75% e 33%, com períodos de exposição de 8 e 16 horas respetivamente. De modo a aferir a ciclicidade do processo dever-se-á efetuar o mínimo de 3 ciclos (Figura 3.16). Segundo a metodologia *NordTest* a variação de massa dos corpos de prova deverá ser inferior a 5%. A existência de revestimentos superficiais, a espessura dos corpos e o coeficiente de transferência de massa à superfície influenciam o valor de *MBV prático* [73].

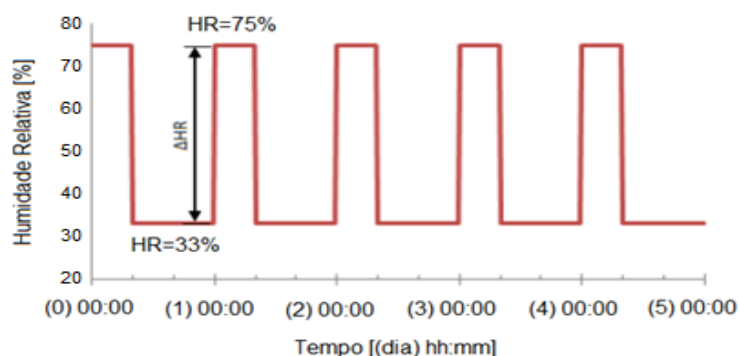


Figura 3.16: Ciclo experimental de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest* [73].

3.3.8 Comportamento higroscópico dos materiais de construção

O método *NordTest* classifica os materiais quanto à sua capacidade higroscópica definindo intervalos com base no *MBV prático* (Tabela 3.5). Estes intervalos, assim como alguns materiais de construção referência servirão de base de comparação de desempenho funcional das formulações testadas (Tabela 3.6).

Tabela 3.5: Intervalos de classificação do valor de *MBV prático* [79].

Classes de <i>MBV</i>	<i>MBV</i>
Insignificante	$\leq 0,2$
Limitado	$[0,2-0,5[$
Moderado	$[0,5-1,0[$
Bom	$[1,0-2,0[$
Excelente	≥ 2

* Valores expressos em $g/(m^2 \cdot \%HR)@8/16h$

Tabela 3.6: Valores do *MBV prático* de materiais de referência [79].

Material	<i>MBV</i>
Contraplacado	1,16
Betão	0,36
Gesso	0,64
Madeira envernizada	0,46
Tijolos	0,47

* Valores expressos em $g/(m^2 \cdot \%HR)@8/16h$

Capítulo 4

Metodologia experimental

4.1 Desenvolvimento de argamassas funcionais

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de argamassas multifuncionais, conciliando propriedades fotocatalíticas, armazenamento e libertação de calor latente e controlo higroscópico, sem sacrifício de propriedades mecânicas, físicas e químicas fundamentais em argamassas de revestimento. Partindo-se de uma argamassa pré-fabricada como base, a *Tradical[®] Décor PF 25* fornecida pela BCB, testou-se a incorporação de vários aditivos, individual e conjuntamente.

A argamassa base e os aditivos selecionados foram caracterizados tentando compreender as suas características e estrutura. As formulações realizadas obtiveram-se através de um processo iterativo ponderando o comportamento funcional dos aditivos selecionados, adicionando-os individualmente em diferentes percentagens à argamassa base, e avaliando o reflexo da sua adição nas propriedades mecânicas, físicas e funcionais da argamassa. Desta forma estabeleceu-se um teor (ou intervalo) ótimo de adição para cada um dos aditivos individualmente. Numa fase posterior, desenvolveram-se formulações conjugando aditivos funcionais. A percentagem de adição dos aditivos descrita neste trabalho é referente à massa de argamassa base, contudo a percentagem de adição de água e superplastificante toma em consideração a massa total de sólidos.

As propriedades mecânicas das argamassas formuladas foram comparadas com a argamassa de referência e aferiu-se o cumprimento de requisitos mecânicos básicos através de ensaios de resistência à compressão e flexão.

Para quantificar o impacto térmico da adição de *PCM's* na formulação de argamassas foram preparados protótipos usando placas isolantes de poliestireno extrudido (*XPS*) (Figura 4.1). Estes protótipos cúbicos com o volume interior de 8000 cm^3 foram revestidos internamente por formulações contendo *PCM's*. Cada face interna do protótipo foi revestida parcialmente, perfazendo uma área total de revestimento interior de aproximadamente 1200 cm^2 (Figura 4.1). Os protótipos foram seguidamente selados pretendendo criar uma atmosfera interior. A temperatura no interior dos protótipos foi monitorizada utilizando termopares tipo K e um sistema de aquisição de dados (Figura 4.2).

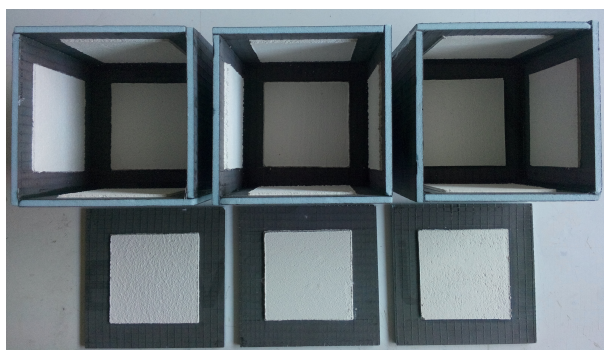


Figura 4.1: Protótipos cúbicos de placas isolantes *XPS* (*Wedi*).

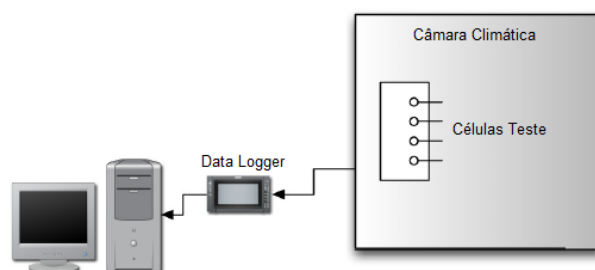


Figura 4.2: Setup experimental - Ensaios térmicos.

Estabeleceu-se ciclos térmicos fazendo oscilar a temperatura no interior da câmara entre 10 e 30°C (perfil 1 de oscilação de temperatura); e entre 10 e 60°C (perfil 2 de oscilação de temperatura) (Figura 4.3). A influência do teor de humidade relativa no interior da câmara também foi estudada.

Em todos os ensaios tomou-se como valor referência os valores registados no protótipo contendo apenas argamassa base, refletindo as diferenças de comportamento térmicos dos restantes protótipos o impacto da adição de *PCM*.

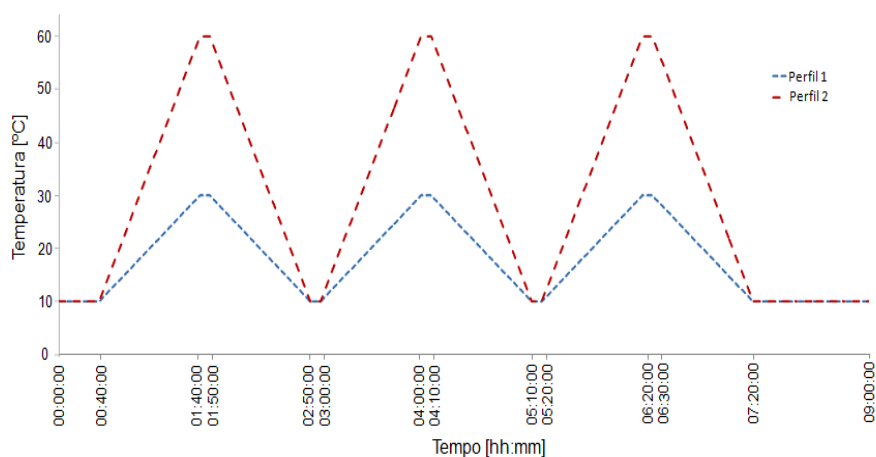


Figura 4.3: Perfis oscilação de temperatura usados na câmara climática.

Para analisar a eficácia do processo fotocatalítico quando as partículas de TiO_2 se encontram dispersas na matriz da argamassa base foram expostos os corpos de prova com diferentes percentagens de incorporação de TiO_2 a uma atmosfera contendo um gás poluente comum (NO_x). A atmosfera criada contém uma mistura de NO_x e AR_K . Nas Figuras 4.4 e 4.5 é possível observar o esquema de montagem do reator usado.

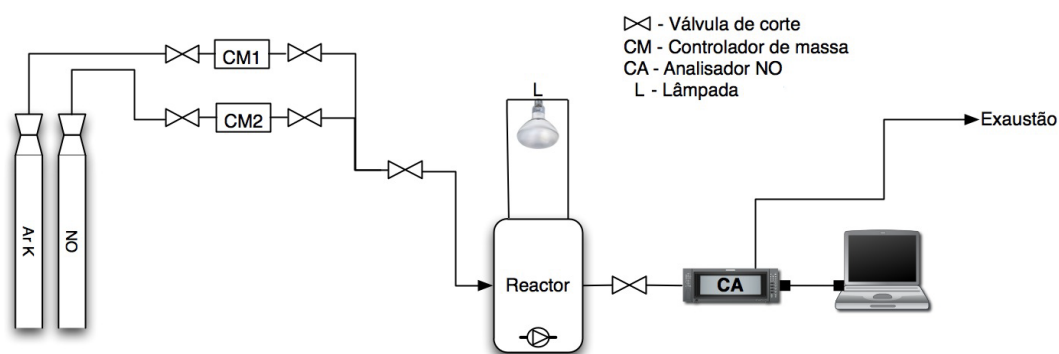


Figura 4.4: Setup experimental de ensaios de degradação de NO_x [64].

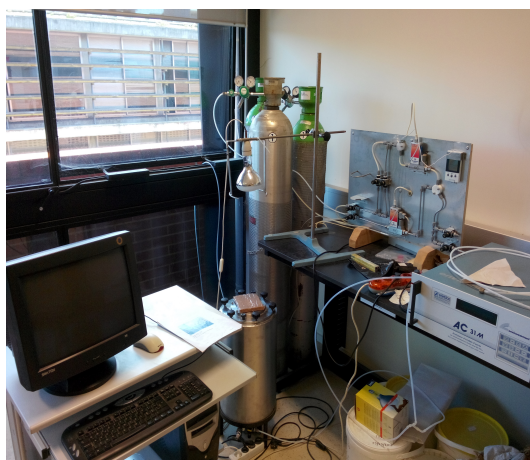


Figura 4.5: Reator e sistema de aquisição de dados.

A concentração de NO_x assim como a lâmpada utilizada variaram, pretendendo-se assim simular ambientes distintos. As concentrações de NO_x testadas foram 0,2 e 0,5 *ppmv* sendo usados dois controladores de caudal para garantir as concentrações pretendidas. A configuração do reator adotada teve por base requisitos de renovação de ar interior definidos na legislação já tidos em consideração em trabalhos anteriormente realizados [64, 80]. O espectro de radiação utilizado assim como a potência incidente por unidade de superfície variou-se alternando-se a lâmpada e a distância ao corpo de prova.

O cilindro de aço inoxidável que constitui o reator apresenta um volume de 35 litros. A existência de uma abertura de vidro na tampa superior estanque

possibilita a entrada da luz. Para simular irradiação solar, uma lâmpada solar OSRAM Ultravitalux de 300W foi colocada num suporte externo ao reator aproximadamente a 85 cm de distância dos corpos de prova, obtendo-se assim o valor de irradiância de 3,6 e 25 W/m^2 na região UV e visível do espectro, respetivamente.

A simulação de irradiação de luz visível efetuou-se com uma lâmpada PHILIPS de 60W. A distância entre os corpos de prova e a lâmpada foi reduzida a 28 cm, ficando os corpos de prova sujeitos a uma irradiância de 7 W/m^2 na região visível do espectro e nula na região UV. As condições de temperatura e humidade relativa interna, apesar de não monitorizadas, foram mantidas idênticas, fixando-se a distância entre a lâmpada e o reator e efetuando-se os ensaios a condições de temperatura e humidade relativa externa idênticas (22,8°C e 79% HR). Desta forma consideraram-se passíveis de comparação os resultados da capacidade de degradação fotocatalítica dos corpos de prova. O aumento da temperatura no interior do reator diminuirá a humidade relativa no interior deste, facto compensado de certa forma pelo aumento da cinética da reação de fotocatalise. A impossibilidade de quantificação da inferência destes fatores na capacidade de degradação fotocatalítica não compromete a capacidade de avaliar comparativamente os corpos de prova testados dada a manutenção das condições externas.

Após a introdução do corpo de prova e respetiva selagem do reator é introduzida a mistura gasosa no interior deste. Foi instalado na base do interior do reator um dispositivo rotativo que garante a homogeneidade da atmosfera interna. É necessário nesta fase estabelecer um período de estabilização para que as condições no interior do reator correspondam às condições da atmosfera pretendida. Este período de estabilização garante que, dado início o ensaio, a redução da concentração de NO_x apenas se deve a processos de degradação fotocatalítica e não a absorção por parte da estrutura porosa do corpo de prova e paredes do tanque, uma vez que estes se encontrarão saturados [81]. A medição da concentração de gás poluente à saída do reator é efetuada com recurso a um medidor de quimiluminescência. A lâmpada é ligada por um período de aproximadamente 1 minuto mantendo ainda a janela no tampo superior do reator coberta, garantindo-se a constância da irradiação emitida. Descoberta a janela no tampo superior do reator inicia-se o processo fotocatalítico de degradação de NO_x . A quantidade de AR_K e NO_x introduzida reator é mantida constante dando-se o ensaio por terminado quando a concentração destes à saída do reator estabilizar, considerando que se atingiu a capacidade máxima de degradação de poluente.

Para quantificação exata do NO_x consumido nos processos de fotocatalise efetuou-se corpos de prova sem qualquer adição de TiO_2 , aferindo-se a interferência da configuração do reator e a fotodecomposição provocada pela irradiação solar existente.

A eficiência fotocatalítica é expressa pela seguinte equação [82]:

$$\eta = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

onde:

- η -Porcentagem de NO_x degradado
- C_{final} -Concentração de NO_x após ensaio de irradiação
- $C_{inicial}$ -Concentração inicial de NO_x

Para avaliação da capacidade de degradação de corantes dos corpos de prova com TiO_2 foram levados a cabo ensaios de quantificação de RhB . Os corpos de prova foram contaminados com uma solução de RhB com uma concentração de $0,05 \text{ g/L}$ num círculo de 7 cm de diâmetro, correspondendo a uma concentração de poluente de $0,86 \mu\text{g/cm}^2$. A exposição dos corpos de prova a espectros e intensidade de luz solar e visível permitiu determinar taxa de degradação deste corante, calculada segundo a formula expressa em 4.2 [56].

$$\zeta = \frac{[RhB]_{inicial} - [RhB]_{final}}{[RhB]_{inicial}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.2)$$

onde:

- ζ -Porcentagem de RhB degradado
- $[RhB]_{final}$ -Concentração de RhB após ensaio de irradiação
- $[RhB]_{inicial}$ -Concentração inicial de RhB

O equipamento usado na medição do parâmetro colorimétrico a^* foi um colorímetro da marca KONICA MINOLTA, modelo Chroma-Meter CR-400. A escolha do corante RhB como contaminante dos corpos de prova reflete considerações feitas no capítulo 3.2.6. A verificação da capacidade de autolimpeza dos corpos de prova avaliando a descoloração através dum colorímetro é meramente qualitativa e não quantitativa.

Para determinação da taxa de degradação do corante foi tomado como valor de referência (a_{ref}^*) a descoloração verificada pelo corpo de prova cuja a sua composição não conta com a adição de TiO_2 ao fim de 3 horas de irradiação.

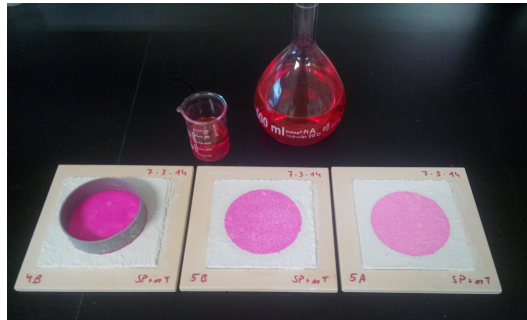


Figura 4.6: Contaminação das amostras com corante Rodamina B.

O comportamento higroscópico das formulações avaliou-se submetendo corpos de prova a variações cíclicas do teor de humidade relativa segundo o método *NordTest*. Através do método *NordTest* aferiu-se a melhoria do comportamento higroscópico com a adição de partículas superabsorventes e agentes porogénicos. Foram preparadas corpos de prova circulares com 120 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. Após cura de 28 dias estes corpos foram isoladas com parafina, com exceção de uma das faces. Desta forma limitou-se a transferência de humidade a essa face, simulando de forma fiável uma argamassa aplicada. Os corpos de provas foram submetidos a ciclos de 75 e 33% de humidade relativa alternadamente, com períodos de duração de 8 e 16 horas respetivamente. Durante todo o ensaio foram registadas as variações na massa dos corpos de prova. A duração dos períodos e teores de humidade selecionados foram definidos tentando simular o impacto de fontes de humidade (ocupantes dos edifícios) e o seu tempo de permanência médio no interior dos edifícios [83]. A metodologia *NordTest* é efetuada em condições isotérmicas e isobáricas. Os corpos de prova foram submetidos a cinco ciclos diários consecutivos para aferir a ciclicidade da transferência de humidade.

Ponderando os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica e funcional elaborou-se composições que conjugassem as diversas funcionalidades pretendidas. Deste forma, foi possível aferir alterações no desempenho mecânico e funcional impostas pela adição de múltiplos aditivos (ver nomenclatura). As formulações obtidas foram otimizadas de forma a conjugar desempenho funcional e características mecânicas em conformidade com o definido para argamassas de revestimento. A metodologia experimental adotada teve por base o organograma da Figura 4.7. A Tabela 4.1 ilustra sumariamente as formulações testadas. O desempenho funcional e mecânico das formulações testadas será apresentado no capítulo 5.

Tabela 4.1: Síntese das formulações testadas.

Referência	% de adição em peso			
<i>PCM</i>	20	-	-	-
<i>nT</i>	1	2	4	-
<i>SAP</i>	0,5	1	1,5	-
<i>V_{er}</i>	5	7,5	10	15
<i>Fb_{Cel}</i>	2,2	4,3	6,3	-
<i>C_{rt}</i>	2,4	4,7	6,9	-
<i>SAP</i> + <i>V_{er}</i>	1+7,5	1+10	-	-
<i>SAP</i> + <i>Fb_{Cel}</i>	1+2,3	1+4,3	-	-
<i>SAP</i> + <i>C_{rt}</i>	1+2,4	1+4,7	-	-
<i>nT</i> + (<i>SAP</i> + <i>VER</i>)	2+(1+7,5)	2+(1+10)	-	-
<i>nT</i> + (<i>SAP</i> + <i>Fb_{Cel}</i>)	2+(1+2,2)	2+(1+4,3)	-	-
<i>nT</i> + (<i>SAP</i> + <i>Crt</i>)	2+(1+2,4)	2+(1+4,7)	-	-
<i>nT</i> + (<i>SAP</i> + <i>Fb_{Cel}</i>)+ <i>PCM</i>	2+(1+4,3)+20	-	-	-

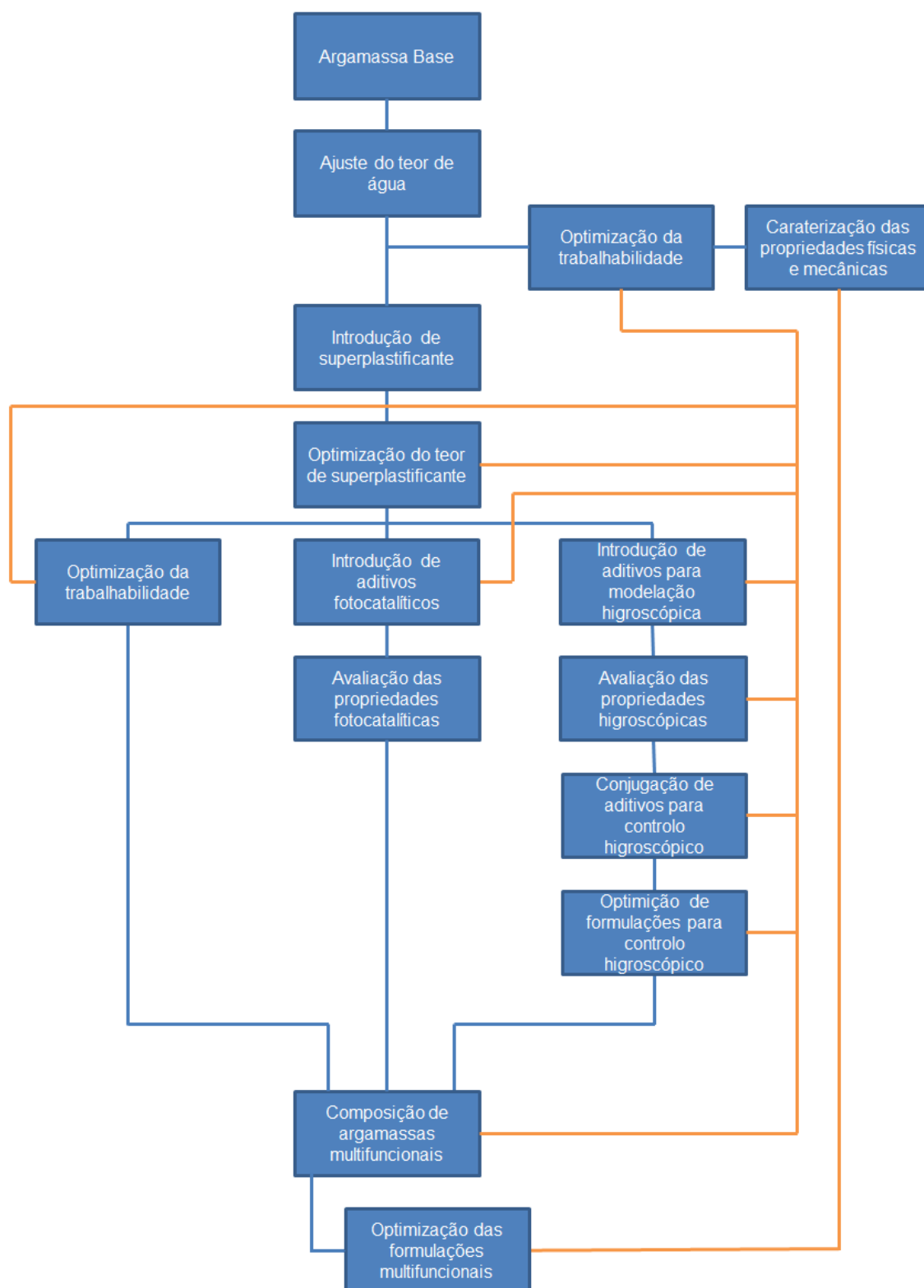


Figura 4.7: Processo experimental no desenvolvimento de argamassas funcionais.

4.2 Ensaios de caracterização

4.2.1 Argamassa base e aditivos funcionais

Análise de distribuição granulométrica pelo método de Coulter

O método de Coulter permite quantificar e determinar o tamanho de partículas detetando e medindo variações de resistência elétrica quando as partículas suspensas num líquido condutor são forçadas a passar por uma pequena abertura onde a existência de elétrodos gera corrente elétrica. A passagem das partículas pelo campo elétrico gerado entre os elétrodos submersos incrementa momentaneamente a resistência elétrica gerando pulsos elétricos passíveis de ser quantificados. O número de pulsos elétricos e o tamanho destes varia consoante a resistência das partículas, permitindo assim avaliar o seu volume tridimensional. A avaliação das perturbações geradas pela passagem das partículas permite então, elaborar uma curva de distribuição granulométrica do material [84]. No presente trabalho foi utilizado o equipamento Coulter Modelo LS230 (Figura 4.8).



Figura 4.8: Equipamento de análise granulométrica.

Análise termogravimétrica

A termogravimetria ou análise termogravimétrica (ATG) é uma análise térmica que monitoriza a variação da massa da amostra em função da temperatura ou tempo de exposição a condições térmicas e atmosféricas constantes. Este ensaio permite avaliar alterações nas propriedades físicas e químicas dos materiais, podendo fornecer informação relativa a fenómenos físicos como transições de fase de segunda ordem (ex: vaporização, sublimação, absorção, absorção e dessorção) e fenómenos químicos com desidratações, decomposições e reações sólidos-gás (ex: reações de oxidação e redução).

A ATG possibilita a caracterização de materiais que exibam perda ou ganho de massa devido a processos de decomposição, oxidação ou perda de partículas

voláteis (ex: água) sendo frequentemente utilizada (i) na caracterização de materiais através da análise de padrões de decomposição, (ii) no estudo de mecanismos de degradação e na (iii) quantificação compostos orgânicos e inorgânicos. No presente trabalho foi utilizado o equipamento Labsys TG-DSC16 da marca Setaram (Figura 4.9).

Análise térmica diferencial

A análise térmica diferencial (ATD) é usualmente usada conjuntamente com a ATG. Assim como a ATG, na análise térmica diferencial obtém-se informação através da diferença entre respostas às variações de temperatura entre um inerte usado como referência e o material em estudo. Contrariamente à ATG que avalia as alterações de massa do corpo com o aumento da temperatura, a ATD baseia-se na monitorização do diferencial térmico. Deste modo, a ATD possibilita detetar no material alterações tanto exotérmicas e endotérmicas. A ATD difere da ATG por não depender da variação de massa, desempenhando um importante papel complementar em análises simultâneas com a ATG, possibilitando a identificação de transições de fase sem variação de massa.

A realização conjunta destas técnicas possibilita uma maior precisão em temperaturas específicas nas quais a variação de massa é pequena e sucessiva. Nestas condições a visualização apenas por ATG é de difícil interpretação sendo necessário recorrer à ATD. A curva de DTA permite conhecer transformações que ocorreram na estrutura do material com a variação da temperatura como : (i) a formação de fases vítreas, (ii) cristalizações, (iii) fusões, (iv) sublimações e (v) decomposições.

No presente trabalho foi utilizado o equipamento Labsys TG-DSC16 da marca Setaram (Figura 4.9).



Figura 4.9: Equipamento ATG-ATD/DSC

Microscopia eletrônica de varrimento

A microscopia eletrônica de varrimento (SEM) permite produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. As imagens tridimensionais produzidas são úteis na avaliação da estrutura superficial facultando informação relativa à distribuição de poros, fases cristalinas e aditivos na matriz da argamassa.

No presente trabalho foi utilizado um microscópio eletrônico de varrimento analítico de alta resolução, de emissão Schottky (SE), da marca Hitachi, modelo SU-70 (Figura 4.10).



Figura 4.10: Microscópio eletrônico de varrimento.

4.2.2 Caracterização das composições em estado fresco

Determinação da consistência por espalhamento

A determinação da consistência no estado fresco da argamassa permite avaliar sua a trabalhabilidade. A trabalhabilidade apesar de não poder ser quantitativamente avaliada, representa um julgamento holístico quanto à capacidade que esta terá de ser misturada homogeneamente, transportada e manipulada para obtenção do acabamento pretendido. A trabalhabilidade da argamassa condiciona fortemente a sua aplicabilidade em obra estando intrinsecamente associada a propriedades como a consistência, a coesão e a plasticidade. No presente trabalho definiu-se espalhamentos na ordem dos $150\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$ como valor de referência, tendo-se ajustado o teor de água de modo a que a consistência de cada formulação se enquadrasse nestes parâmetros. O procedimento de determinação da consistência da argamassa no estado fresco segue a norma vigente EN 1015-3 de 1999, correspondendo ao diâmetro médio verificado na mesa ao espalhamento. A homogeneização automática do amassado realizou-se utilizando um equipamento KitchenAid, modelo KSM90.

Estudo do comportamento reológico

Para uma caracterização mais detalhada das propriedades no estado fresco foi utilizado um reómetro da marca Viskomat NT (Figura 4.11).



Figura 4.11: Reómetro Viskomat NT.

Os ensaios de reologia permitem entender a forma como a incorporação materiais de baixa granulometria afeta as propriedades das argamassas.

O modelo de Bingham descreve o comportamento reológico das argamassas através da seguinte equação:

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma \quad [P_a] \quad (4.3)$$

Onde:

- τ -tensão de corte $[P_a]$
- τ_0 -tensão limite de escoamento $[P_a]$
- η -viscosidade plástica $[P_a.s]$
- γ -taxa de deformação $[s^{-1}]$

O reómetro mede o valor de torque $[T]$ em função da velocidade de rotação (N) do copo do reómetro durante o período de tempo programado para o ensaio. A aquisição de dados é realizada pelo equipamento sendo posteriormente possível determinar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica. O valor do torque pode ser relacionado com a velocidade de rotação do copo através da seguinte equação:

$$T = g + hN \quad [N.mm] \quad (4.4)$$

Onde:

- g -coeficiente de tensão de cedência ou de escoamento $[N.mm]$
- h -coeficiente proporcional à viscosidade plástica $[N.mm.min]$
- N -Velocidade de rotação $[rpm]$

A velocidade máxima de rotação selecionada foi de 100 rpm com paragens a cada quinze minutos. A variação na velocidade de rotação permite definir curvas de fluxo ($f_{(N)} = T$) que com base na equação 4.4 possibilita monitorizar os parâmetros g e h a cada quinze minutos.

Determinação de tempo de presa inicial e final

A determinação do tempo de presa inicial e final é definido pela penetração de uma agulha na argamassa até que esta atinja determinados valores. O aparelho automático de *Vicat* mede a resistência da pasta à penetração de uma agulha sob ação de um peso de 300 g. O tempo de presa inicial corresponde ao tempo decorrido entre a amassadura e a perda de plasticidade enquanto o tempo de presa final é o tempo necessário para que a pasta adquira consistência suficiente para resistir à pressão exercida pela agulha. Na prática quantifica-se o tempo de presa inicial como sendo o tempo decorrido entre a amassadura e primeira penetração inferior a 9 mm enquanto que o tempo de presa final é considerado o tempo necessário a que a penetração da agulha seja inferior a 0,5 mm. De notar ainda, que a NP EN 196-3 de 2005 especifica a utilização de duas agulhas distintas. No presente trabalho o aparelho de *Vicat* utilizado foi o modelo C3370, da marca GeoTest.

4.2.3 Caracterização das composições em estado endurecido

Determinação da densidade aparente no estado endurecido

A densidade aparente dos corpos de prova determinou-se segundo a norma vigente EN 1015-10 de 1999. A densidade aparente é o quociente entre a massa seca do corpo de prova e o volume por este ocupada quando submerso em condições saturadas. O fluido usado para submergir os corpos de prova foi água ($\rho \simeq 1 \text{ Kg/m}^3$) simplificando-se a expressão para determinação da densidade aparente a:

$$D_{ap} = \frac{m_{seco}}{m_{sat} - m_{im}} \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (4.5)$$

onde:

- m_{seco} -Massa do corpo de prova seco
- m_{sat} -Massa do corpo de prova saturado
- m_{im} -Massa do corpo de prova saturado imerso (pesagem hidrostática)

Determinação da porosidade aberta e absorção de água

A porosidade aberta dos corpos de prova no estado endurecido, ou seja a quantidade de vazios intercomunicados existentes na sua microestrutura onde poderá ocorrer a passagem de fluídos por percolação ou capilaridade, condiciona as propriedades e características funcionais das argamassas. Com base nos valores obtidos no ensaio da determinação de densidade aparente é possível caracterizar a porosidade aberta (P_{ab}) e absorção de água (A_{ag}) dos corpos de prova. O princípio de Arquimedes serve de base às seguintes equações que não se encontram descritas em normativas legais.

$$P_{ab} = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{m_{sat} - m_{im}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.6)$$

$$A_{ag} = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{m_{seco}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.7)$$

Absorção de água por capilaridade

A definição do coeficiente de absorção de água por capilaridade permite, não só comparar a estrutura capilar entre os corpos de prova, como verificar a diferença comportamental existente entre as fases de absorção e liberação de água.

No presente trabalho a determinação do coeficiente de capilaridade efetuou-se segundo a norma vigente EN 1015-18 de 2002, sendo por definição igual ao declive de uma linha reta entre a massa do corpo de prova após 10 e 90 minutos após submersão de uma das suas faces através da expressão 4.8.

$$C_c = 0,1(M_{90} - M_{10}) \quad [Kg/m^2\sqrt{min}] \quad (4.8)$$

onde:

- C_c -Coeficiente de capilaridade
- M_{10} -Massa do corpo de prova após 10 minutos de submersão de uma das suas faces
- M_{90} -Massa do corpo de prova após 90 minutos de submersão de uma das suas faces

O coeficiente de capilaridade reporta à primeira fase de absorção de água representando a velocidade com que a água é inicialmente absorvida pelo material.

Valor assintótico da curva de absorção de água por capilaridade

Para além da análise da primeira fase de absorção de água por capilaridade, é necessário ainda considerar uma segunda fase de absorção capilar resultante da migração simultânea das fases líquida e gasosa que dependem de fenómenos de

convecção e de difusão e da ação da capilaridade associada a gradientes externos de pressão.

O valor assintótico da curva de absorção de água por capilaridade relaciona a quantidade de água absorvida por unidade de superfície do provete $[Kg/m^2]$ ou seja, traduz a quantidade máxima de água absorvida por uma determinada área exposta à presença de água.

Desta forma, e não se encontrando o valor assintótico correlacionado com a variável temporal é facilmente compreendida a relação de linearidade entre o valor assintótico e a porosidade aberta existente no material.

Na prática, o valor assintótico indica a quantidade de água que será absorvida em longos períodos de exposição das argamassa a humedecimento, determinado através da expressão 4.9.

$$V_{assimp} = (M_{seco} - M_{sat})/A \quad [Kg/m^2] \quad (4.9)$$

onde:

- M_{seco} -Massa do corpo de prova seco
- M_{sat} -Massa do corpo de prova saturado
- A -Área exposta a humedecimento

Índice de secagem

O estudo da cinética de secagem das argamassas permite conhecer a facilidade de redução do teor de água retido no interior da estrutura porosa após períodos de humedecimento.

O processo de secagem apresenta duas etapas bastante distintas quer na taxa de secagem quer na natureza do processo. Numa primeira fase a diminuição do teor de água das argamassa ocorre por evaporação sendo forças de capilaridade as principais responsáveis pelo transporte através dos poros de maiores dimensões. Nesta fase, a redução do teor de água ocorre a uma taxa constante correspondente ao declive da curva de evaporação até ao ponto de inflexão de declive. Na segunda fase do processo a taxa de secagem apresenta-se menor, representando a ocorrência de fenómenos de difusão de vapor e difusão superficial através dos poros de menores dimensões. Nesta fase a taxa de secagem diminui gradualmente até que seja atingido o teor de água de equilíbrio higroscópico.

A porosidade exerce um papel preponderante na capacidade de secagem das argamassas uma vez que a circulação de água e vapor se processa através da rede porosa da estrutura interna das argamassas. Note-se ainda a influência no processo de secagem de fatores como: (i) a humidade relativa, (ii) a temperatura, (iii) a velocidade do vento e da (iv) rugosidade superficial.

A resistência à secagem de determinado material é expressa através da curva de evaporação mostrando a variação ao longo do tempo do teor de água da amostra e quantificada através do índice de secagem (I_s) expresso na equação 4.10.

$$I_s = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(w)dt}{w_0.t_f} \quad [Kg/(h.m^2)] \quad (4.10)$$

onde:

- w_0 -Teor de água do provete saturado [%]
- w -Teor de água do provete no instante t [%]
- t_f -Tempo de secagem [h]

O índice de secagem representa o processo de secagem na sua globalidade não considerando as distintas fase do processo de secagem. Este parâmetro permite comparar a velocidade de abandono de água da estrutura das argamassas sendo crucial para o entendimento do processo.

Ensaio módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio Pundit permite determinar de forma não destrutiva a resistência mecânica e módulo de elasticidade dinâmico a partir da velocidade de propagação de impulsos de ultrassom. Utilizando um gerador de impulsos ultrassônicos e conhecidas a dimensões de um determinado corpo, facilmente se define a velocidade de propagação no corpo [$mm.\mu s$]. Este ensaio realizou-se segundo a norma britânica BS 1881-203 de 1986, não sendo contudo o valor do coeficiente de Poisson determinado, admitido-se um valor intermédio de 0,25.

No presente trabalho os ensaios foram realizado recorrendo ao equipamento Pundit, modelo 6. Os resultados obtidos apenas foram considerados na determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Na determinação da resistência mecânica considerou-se os resultados obtidos por ensaios destrutivos.

Resistência mecânica à flexão e compressão

A resistência à compressão da argamassa no estado endurecido representa o máximo esforço que a argamassa pode resistir quando submetida a um carregamento que provoque tensões axiais de compressão sem que tal carga implique a sua cedência. De forma análoga, a resistência mecânica à flexão de uma argamassa no estado endurecido representa o máximo esforço a que esta pode resistir quando submetida a um carregamento que gere tensões axiais de tração sem que atinja a tensão de rutura. A caracterização dos corpos de prova quanto às suas características mecânicas de flexão e compressão realizou-se utilizando uma máquina universal de ensaios, modelo *AG-IC 100kN*, da marca *Shimadzu* com anéis de carga de $5kN$, segundo a norma NP EN 1015-11 de 1999.

Estudo da fissuração na aplicação sobre tijolo

A retração da argamassa no estado endurecido resulta da contração volumétrica provocada da perda de água absorvida na superfície dos constituintes sólidos da pasta endurecida e da redução do volume dos compostos hidratados em relação ao volume que estes ocupam no estado fresco. Este fenómeno tridimensional expressa pela relação entre a distância entre dois pontos num determinado momento de controlo e o afastamento original entre estes dois pontos $[m/m]$. A redução da distância entre dois pontos varia em função da composição da argamassa e do tempo decorrido entre o momento de controlo e a amassadura da argamassa. A introdução de aditivos hidrófilos e de aditivos com baixa granulometria implica o aumento do teor de água necessário para garantir a trabalhabilidade definida. Este aumento poderá provocar uma retração excessiva originando abertura de fissuras na superfície da argamassa no estado endurecido.

Para avaliar a formação de fissuras na superfície da argamassa com as três competências funcionais definidas, realizaram-se ensaios em tijolo sendo avaliada a evolução da superfície aos 7, 28 e 90 dias. Após aplicação do chapisco, foi colocada uma camada de argamassa base sem qualquer aditivo. Após 72 horas de cura foi aplicada a camada de finalização com 3 mm de espessura. A cura foi realizada numa atmosfera controlada com temperatura e humidade relativa constante, 20°C e 65% respetivamente.

Avaliação da porosidade a baixa pressão

A avaliação da porosidade pelo ensaio de *Krsten* trata-se de uma técnica de ensaio simples e expedita que permite avaliar a porosidade superficial de uma argamassa de revestimento aplicada.

Esta técnica de diagnóstico in-situ possibilita aferir o desempenho face à ação da água de argamassas em condições de serviço através da medição da permeabilidade à água líquida sob baixa pressão.

Fatores como a pressão exercida pela água na superfície de contacto e as condições climáticas a que se realizam os ensaios influenciam os resultados obtidos [85], tendo no presente trabalho sido mantidos estes pressupostos constantes.

O coeficiente de absorção de água a baixa pressão pode ser determinado, entre outros métodos, pela expressão:

$$C_{absorvido} = \frac{X \cdot 10^{-3}}{d^2 \cdot (\frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{t} \cdot 10^6)} \quad [Kg/(m^2/\sqrt{m})] \quad (4.11)$$

onde:

- X - quantidade de água absorvida [ml]
- d - diâmetro da superfície em que é feita a penetração de água [mm]
- t - duração da leitura [h].

Ensaio de aderência por tração direta

O ensaio de aderência por tração direta *pull-off* permite avaliar a resistência e durabilidade de argamassas em serviço.

Este ensaio consiste na aplicação manual de uma força de tração, transmitida axialmente a uma peça metálica fixada previamente no provete. O registo do aumento gradual da força possibilita conhecer a força necessária ao arrancamento. Através da análise ocular da secção do provete pode-se observar se a secção de fissuração pertence à ligação entre a argamassa e peça metálica (arrancamento por aderência entre os materiais) ou se a fissuração acontece na própria argamassa (arrancamento por tração). No presente trabalho os valores da tensão de aderência foram determinados aos 28 dias de cura usando um dinamómetro da marca Dyna, modelo Z. Este equipamento apenas fornece a força necessária ao arrancamento de uma porção de revestimento (F_u) sendo obrigatório a divisão deste valor pela área de aplicação da força axial para se conhecer a tensão de aderência à tração da argamassa (f_u), como apresentado na expressão 4.12.

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad [MPa] \quad (4.12)$$

onde:

- F_u - Carga de rotura [kN]
- A - Área da pastilha [m²].

Capítulo 5

Resultados e discussão

5.1 Caracterização da argamassa base e aditivos funcionais

5.1.1 Caracterização da argamassa base

No presente trabalho utilizou-se a argamassa comercial pré-fabricada *Tradical*® *Décor PF 25* como formulação de base (doravante designada TD25). Não sendo caracterizável a sua formulação por se tratar de um produto comercial, realizou-se apenas a caracterização genérica do produto e das suas capacidades funcionais.

A análise granulométrica pelo método de *Coulter* revelou um tamanho de partícula inferior a $200\ \mu\text{m}$ com valor médio de $42,88\ \mu\text{m}$, não existindo predominância, em termos percentuais, de nenhum intervalo de dimensão de partículas (Figura 5.1). A argamassa TD25 apresenta uma granulometria fina sendo constituída por 50% por partículas de dimensão inferior a $18,31\ \mu\text{m}$ (Tabela 5.1). A granulometria determinada encontra-se em consonância com a informação disponibilizada pelo produtor, de tamanho máximo de partícula de $1\ \text{mm}$.

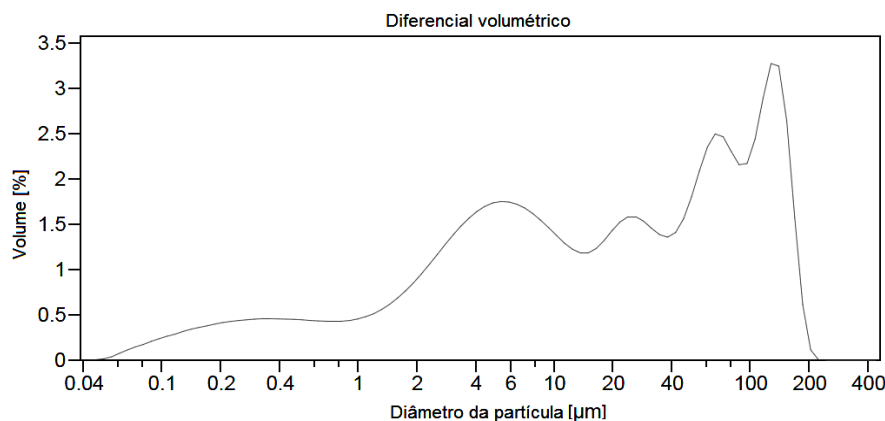


Figura 5.1: Curva de distribuição granulométrica diferencial da argamassa TD25.

Tabela 5.1: Distribuição granulométrica da argamassa TD25.

% <	Diâmetro da partícula [μm]
10	0,763
25	3,876
50	18,31
75	72,22
90	127,2

As análises ATG-ATD da argamassa TD25 mostraram um ligeiro decréscimo de massa (cerca de 2%) com o acréscimo da temperatura até 200°C indicador da presença de humidade na sua composição.

Não se regista a presença de matéria orgânica uma vez que não se verifica a existência de uma reação exotérmica significativa. A ocorrência de um pico endotérmico aproximadamente aos 550°C indica a decomposição de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) em óxido de cálcio (CaO) e água (H_2O) denotando a presença de cal na argamassa TD25. Também foi observável um pico endotérmico aos 573°C característico da transformação de quartzo alfa em quartzo beta.

A análise ATD mostra ainda um pico endotérmico aproximadamente aos 850°C característico da reação de formação de óxido de cálcio (CaO) a partir de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A perda de aproximadamente 16% de massa da amostra confirma a presença de calcário (Figura 5.2).

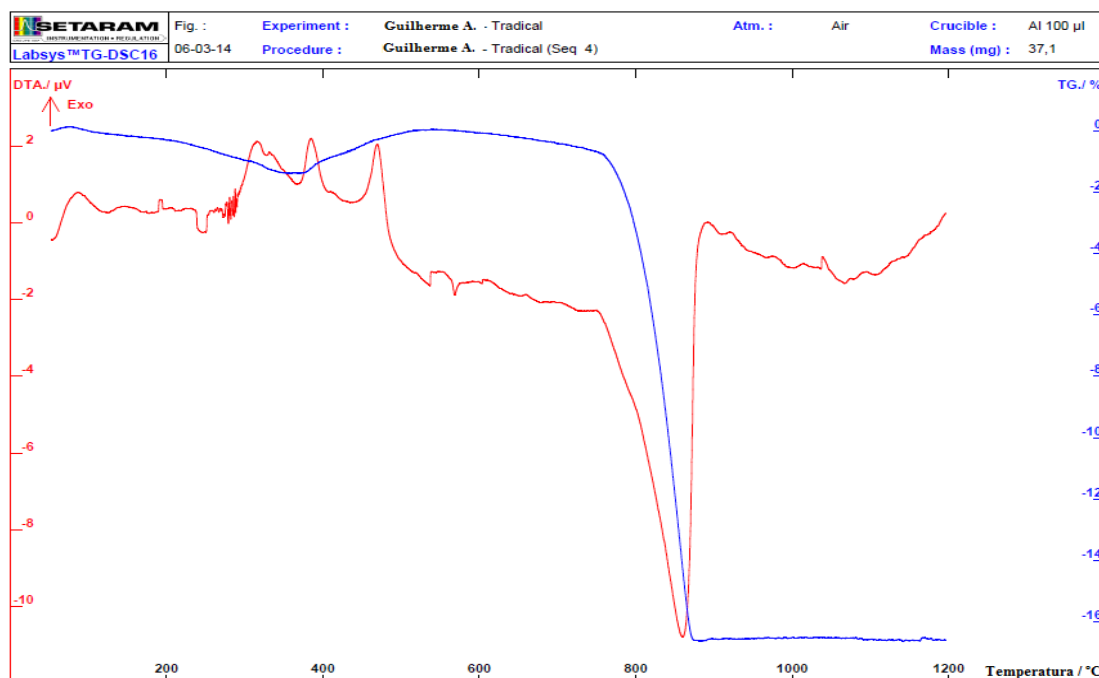


Figura 5.2: Análise ATG/ATD da argamassa TD25.

5.1.2 Caracterização dos aditivos incorporados

Superplastificante

Para diminuição dos teores de água incorporados necessários para garantir os valores de trabalhabilidade definidos, foi adicionado como aditivo um superplastificante da *BASF*, o *Glenium 52*. O *Glenium 52* é um superplastificante à base de éter policarboxilato modificado de elevado desempenho contendo 20% de matéria sólida. A diminuição do teor de água de amassadura contribuirá de forma indireta para a melhoria das características mecânicas das argamassas.

Aditivo para armazenamento de calor latente *PCM*

No presente trabalho experimental o aditivo selecionado para o armazenamento e restituição de calor latente foi o *PCM Micronal DS5008* da *BASF*. A escolha de uma parafina microencapsulada comercial deveu-se às considerações de ordem técnicas expostas em 3.1 e à necessidade de garantir as quantidades estimadas para este estudo, mantendo-se a qualidade e constância das características do *PCM*. O *PCM Micronal DS5008* da *BASF* encontra-se descrito na literatura, mostrando resultados satisfatórios no armazenamento e libertação de calor latente e elevada compatibilidade quando introduzido em argamassas mistas [64]. Deste modo, salvaguardando recursos e tratando-se de um produto comercial extremamente controlado, tomou-se em consideração a caracterização descrita por Lucas *et al.* [64].

No referido trabalho a temperatura de transição de fase do *PCM* foi aferida através de calorimetria diferencial de varrimento (*DCS*) sendo 23 e 25 °C durante a fase de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Situando-se a temperatura de transição de fase nesta gama de temperaturas, o *Micronal DS5008* perfila-se como adequado para a aplicação em argamassas para modelação térmica de ambientes interiores dada a coincidência das temperaturas de mudança de fase com a zona de conforto térmico no interior de edifícios. Segundo Lucas *et al.* [64] a análise da distribuição granulométrica também não apresentou qualquer disparidade com os dados fornecidos pelo fabricante, apresentando uma dispersão granulométrica situada entre 3 e 20 μm e tamanho médio de 6,2 μm .

O *PCM Micronal DS 5008* foi submetido a microscopia eletrónica de varrimento (*SEM*) onde foi observável que a agregação de partículas de *PCM* com dimensões inferiores a 1 μm se encontra na origem da formação das partículas detetadas na *DCS* com dimensão superior a 3 μm [64].

Aditivo fotocatalítico - Nanopartículas de dióxido de titânio

Como aditivo funcional com a capacidade de conferir propriedades fotocatalíticas às argamassas selecionou-se o dióxido de titânio *Aeroxide P25* da Degussa/Evonik (TiO_2). Mais uma vez este produto comercial encontra-se extensamente descrito na literatura, tendo-se considerado a caracterização realizada em Lucas *et al.* [64]

O ensaio de DRX confirmou a presença da anatase como fase cristalina maioritária (80%), enquanto o rutilo representa os restantes 20% [64]. A mistura de fases cristalinas encontra-se justificada na literatura pelo aumento da atividade fotocatalítica registada relativamente a utilização dessas mesmas fases cristalinas isoladamente [86].

A análise da distribuição granulométrica pelo método de *Coulter* demonstra um tamanho médio de partícula de $1,7 \mu\text{m}$, sendo o material composto por partículas cuja dimensão varia entre 0,5 e $4 \mu\text{m}$. A distribuição granulométrica não é coerente com a informação de tamanho médio de partícula de 21 nm fornecida pelo fabricante. Esta disparidade sugere que pode ter ocorrido aglomeração de partículas na dispersão para análise [64].

A análise do dióxido de titânio *P25 Degussa* através da sua visualização ao microscópio eletrónico de varrimento tornou possível observar dimensões inferiores a 30 nm . Lucas *et al.* [64] mediu a área superficial do dióxido de titânio *P25 Degussa* ($44,6 \text{ m}^2/\text{g}$), sendo este valor próximo da indicação de $50 \text{ m}^2/\text{g}$ fornecida pelo fabricante.

Aditivos com capacidade higroscópica

A necessidade de minimizar o gradiente de humidade relativa registado no interior de edifícios utilizando os materiais de construção como agentes passivos na modelação higroscópica, envolve a introdução de aditivos como polímeros superabsorventes (*SAP*), agregados leves (p.e. vermiculite e perlite) e outros agentes porogénicos (p.e. pós de alumínio) em betões e argamassas. A introdução destes aditivos provoca alterações estruturais nas argamassas induzindo uma significativa redução da sua densidade, alterando a inércia térmica e a resistência ao fogo. A incorporação destes aditivos pode acarretar ainda diversas consequências nefastas para as argamassas como a perda de trabalhabilidade e de resistência mecânica e o aumento da tendência para ocorrer de segregação e fissuração. A incerteza no teor de água de amassadura efetivo é outra das dificuldades na formulação de argamassas contendo aditivos com elevada afinidade higroscópica. No presente trabalho caracterizou-se individualmente os aditivos higroscópicos e avaliou-se o seu impacto nas características mecânicas da argamassa TD25. Numa fase posterior tentou-se otimizar o desempenho das formulações conjugando aditivos com elevada capacidade higroscópica.

Caracterização dos aditivos higroscópicos

Poliacrilato de sódio

A elevada afinidade do poliacrilato de sódio (*SAP*) relativamente às moléculas de água, traduzido pela capacidade de retenção de água de até 800 vezes a sua massa, classifica este material como superabsorvente. A absorção de água ocorre por um processo osmótico, ou seja, a água migra de zonas de menor concentração iónica

(zona exterior do polímero) para zonas de maior concentração (zona interior do polímero). A dissolução do grupo carbonilo acontece quando o poliacrilato de sódio entra em contacto com água, libertando dois iões distintos da cadeia principal, (i) o carboxílico e o (ii) sódio. Os grupos carboxilos possuem carga negativa, gerando repulsão mútua e causando a expansão da estrutura interna do material, permitindo dessa forma a retenção de água. A absorção de água apenas termina quando se atinge o equilíbrio iónico entre a parte interior e exterior do polímero. À escala macroscópica este processo caracteriza-se pela formação dum gel [87].

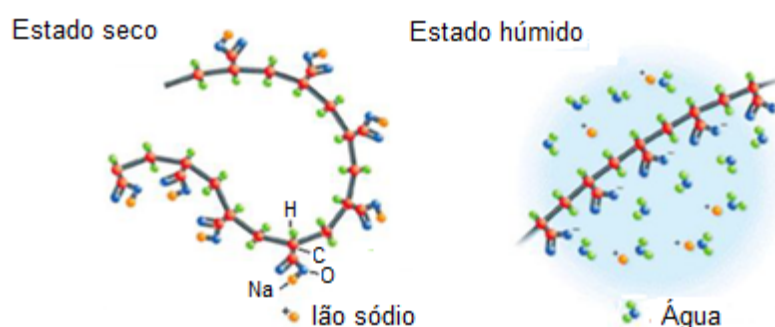


Figura 5.3: Processo de osmose do poliacrilato de sódio.

O uso de poliacrilato permite obter argamassas com a classificação de "Excelente" segundo o método *NordTest*, tendo um valor de *MBV prático* muito superior a 2 [88]. No presente trabalho usou-se o poliacrilato de sódio Produkt T 5066 G, produzido pela Evonik. As partículas de *SAP* apresentam formas e tamanho irregulares como é possível observar na Figura 5.4.

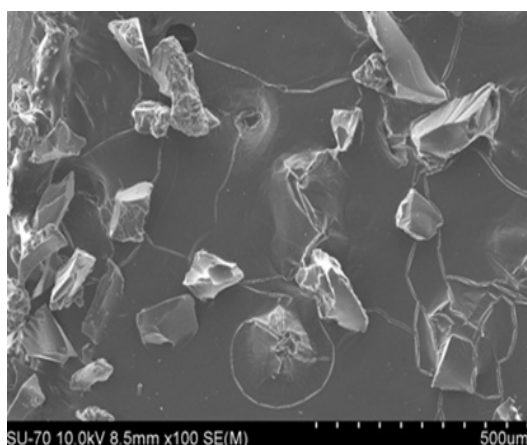


Figura 5.4: Imagens de SEM mostrando a forma irregular das partículas de *SAP*.

Vermiculite expandida

A vermiculite é um mineral lamelar constituído por silicatos de alumínio, magnésio e ferro hidratados sendo a sua formula química $[(MgFe, Al)_3(AlSi)_4O_{10}(OH_2).4H_2O]$.

A designação de vermiculite (V_{er}) provém do termo Latim *vermiculare* fazendo alusão à sua geometria similar à de um verme.

A vermiculite comercial após fragmentação é geralmente sujeita a tratamento térmico, esfoliando entre 900 e 1000°C. A expansão volumétrica das moléculas de água retidas nas suas lamelas contribui para a expansão observada com o aumento da temperatura (Figura 5.5) [89].

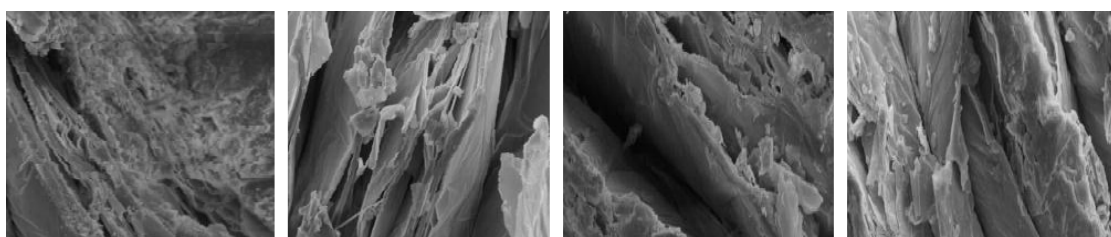


Figura 5.5: Imagens de SEM da evolução das lamelas de vermiculite em função da temperatura: a) 20°C; b) 300°C; c) 600°C; d) 900°C [88].

A geometria reticulada resultante deste processo confere à vermiculite uma densidade bastante baixa devido à existência de uma grande quantidade de vazios na sua estrutura (Figura 5.6). Propriedades físicas e químicas da vermiculite como a estabilidade química (inerte e não tóxica), baixa densidade (80 a 120 Kg/m^3), baixa condutividade térmica e acústica e natureza hidrófila (capacidade de absorção de água de cerca de 7 vezes o seu peso) potenciam a sua utilização em sistemas construtivos para controlo higroscópico no interior de edifícios.

Na incorporação de vermiculite em argamassas é necessário garantir a não existência de asbestos na sua constituição mineralógica, dado tratar-se de um agente associado ao desenvolvimento de doenças cancerígenas.

A vermiculite usada no presente trabalho foi comercializada pela Aguiar e Melo Ltd., Portugal; e apresenta uma granulometria entre 315 e 1230 μm segundo as especificações do fabricante e que foi confirmada por microscopia ótica (Figura 5.6).



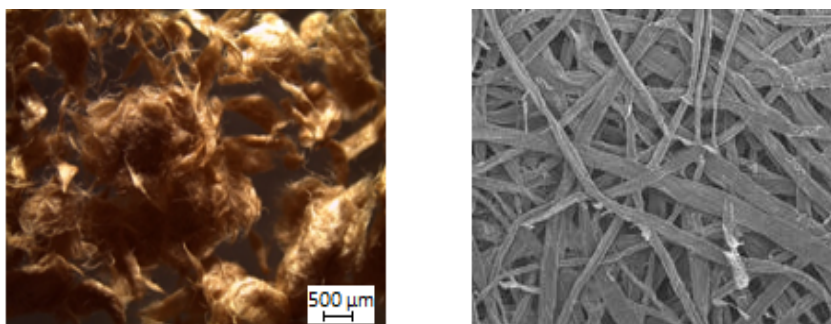
Figura 5.6: Vermiculite expandida.

Fibras de celulose

As fibras de celulose (Fb_{Cel}) são formadas por células individuais compostas por microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e orientação.

Através da observação microscópica pode-se confirmar que a celulose utilizada no presente trabalho é constituída por um emaranhado de fibras de morfologia irregular, formando uma estrutura porosa. As fibras apresentam uma geometria cilíndrica, com o entrelaçamento das fibras de maior dimensão causado pelas fibras de menor tamanho (Figura 5.7).

Não foi possível determinar a granulometria pelo método de sedimentação (*Coulter*) mas a observação microscópica revela conjuntos de fibras com dimensão máxima de 1500 μm .



(a) Aglomerados de fibras de celulose

(b) Entrelaçamento das fibras de celulose

Figura 5.7: Observação microscópica de fibras de celulose.

As análises ATG-ATD revelaram a existência de humidade no interior das fibras de celulose, havendo perda de cerca de 10% de massa da amostra durante o aquecimento até 200 °C. O teor exato da humidade retida nas fibras determinou-se expondo 3 amostras a uma temperatura de 100 °C durante um período de 24 horas. A perda de massa média de 9,8% confirma o resultado obtido através de ATG. Este teor de humidade foi posteriormente ponderado na formulação de argamassas contendo este aditivo.

Através das análises ATD-ATG confirmou-se ainda a natureza maioritariamente orgânica das fibras de celulose com perda de aproximadamente 90% da massa da amostra até 800 °C. A ATD revela a existência de uma reação exotérmica entre 250 e 350 °C, coincidente com fase de aquecimento onde se verifica a maior perda de massa (cerca de 70%). As fibras foram acondicionadas de modo a manter constantes as suas características durante o decorrer de todo o procedimento experimental.

A seleção das fibras de celulose como aditivo capaz na modelação higroscópica reflete uma análise bibliográfica onde se comprova o seu valor de *MBV prático* superior a 2 [88]. A perspetiva ecológica deste trabalho encontra-se exposta no uso de fibras de origem orgânica não processadas (não sujeitas a branqueamento) em detrimento de produtos sintéticos.

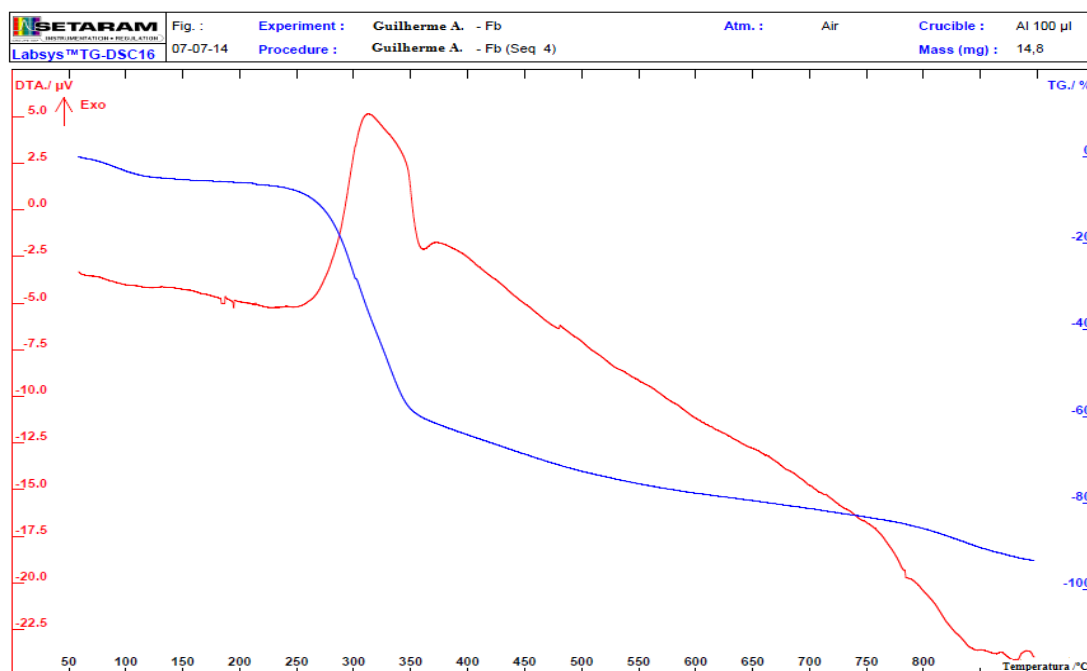


Figura 5.8: ATG/ATD de fibras de celulose.

Cortiça

A natureza complexa e a variável constituição química da cortiça torna impossível o conhecimento exato das suas características. A variabilidade da constituição química da cortiça tem origem na própria árvore da qual esta foi extraída e nos fatores ambientais aos quais esteve sujeita. Duma forma genérica a cortiça é quimicamente constituída por:

- Suberina (45%)
- Lenhina (27%)
- Polissacáridos (12%)
- Ceróides (6%)
- Taninos (6%)
- Cinzas (4%).

As membranas finas da sua estrutura alveolar encontram-se impregnadas com gás semelhante a ar, que ocupa cerca de 90% do seu volume. A presença deste gás confere à cortiça uma densidade bastante reduzida. A espessura das paredes celulares, que são constituídas maioritariamente por lenhina e celulose, varia entre 1 e 2,5 μm . As dimensões dos alvéolos variam entre 10 e 50 μm de largura e 10 e

70 μm de altura, exibindo como dimensões médias 35 e 40 μm de largura e altura, respetivamente (Figura 5.9) [90].

Apesar da presença de compostos com um certo grau de impermeabilidade na sua estrutura, a incorporação de cortiça permitirá a criação de poros na matriz da argamassa, podendo contribuir para o aumento da capacidade higroscópica do material. Uma pior aglutinação dos componentes das argamassas e a presença de poros alveolares traduzir-se-á numa menor densidade das argamassa podendo beneficiar a capacidade de retenção e libertação de água. No entanto, a introdução de cortiça na argamassa aumentará a probabilidade de desintegração do material. A cortiça poderá apresentar diversos defeitos estruturais, tais como malhas amarelas ou verdes, a presença de insetos, etc, significativos na indústria rolheira mas insignificantes para aplicações no setor da construção [91]. Características técnicas como a elevada estabilidade dimensional, térmica e biológica e a não toxicidade, juntamente com o caráter sustentável da utilização de ecomateriais como aditivos para controlo higroscópico em argamassas, fundamentou a seleção de cortiça como aditivo no presente estudo. A cortiça apresenta uma massa volúmica de aproximadamente 200 Kg/m^3 . A fração utilizada no presente trabalho possui tamanho inferior a 500 μm (Figura 5.9).

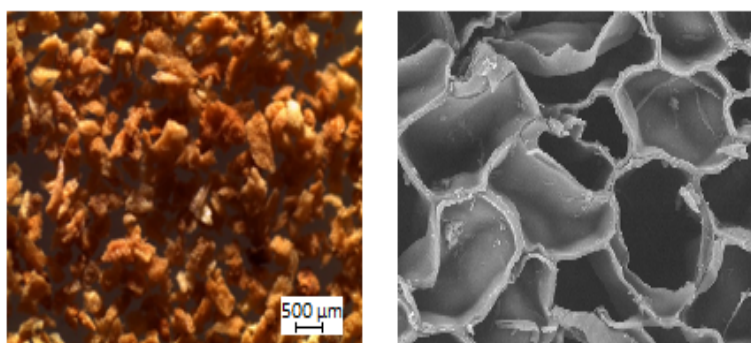


Figura 5.9: Aglomerados e estrutura alveolar da cortiça.

As análises ATD-ATG mostraram uma perda massa de cerca de 90% entre 250 e 800°C e a existência de um reação exotérmica nesse mesmo intervalo de temperaturas confirmando a origem maioritariamente orgânica da cortiça. Durante o aquecimento verificou-se ainda que a perda de massa é mais acentuada até 400°C. Verifica-se que a perda de massa durante o aquecimento até 200°C não é significativa. Tal facto corrobora o teor de humidade de 1,78% determinado através da exposição de 3 amostras a uma temperatura de 100°C durante um período de 24 horas. Uma vez mais, o teor de humidade presente neste aditivo orgânico foi posteriormente considerado na formulação de argamassas. Também a cortiça foi acondicionada de modo a manter constantes as suas características durante o decorrer de todo o procedimento experimental.

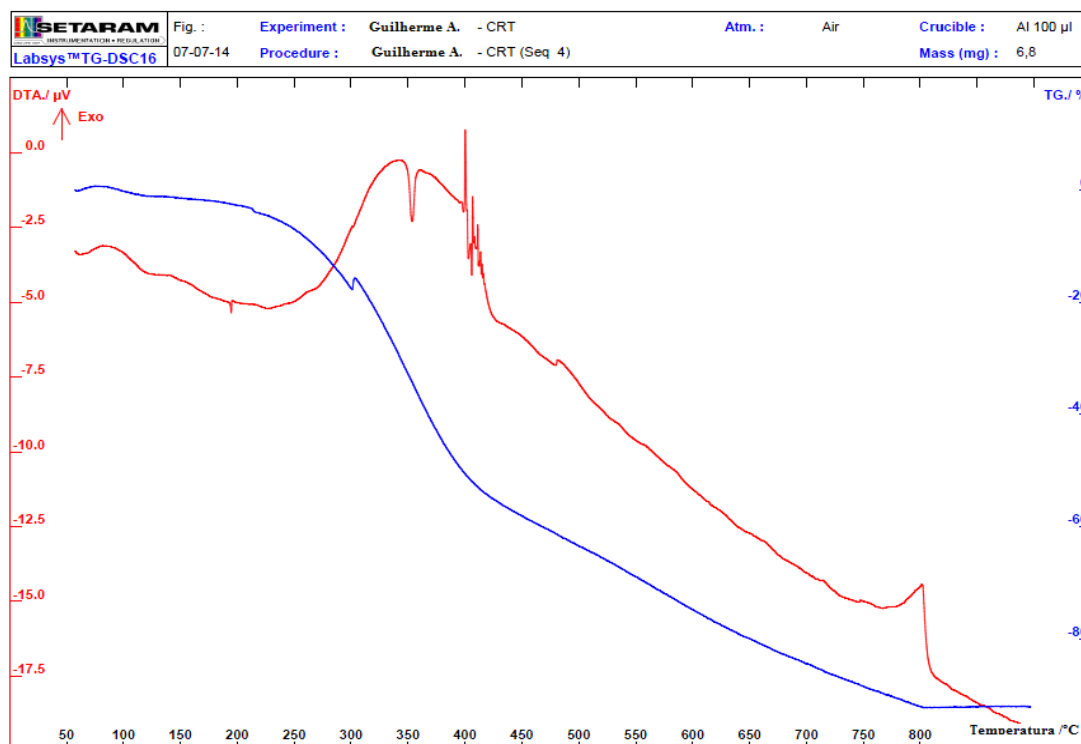


Figura 5.10: ATD/ATG de aglomerados de cortiça.

5.2 Caracterização e estudo de desempenho funcional

5.2.1 Argamassa base

Adição de superplastificante

O teor de superplastificante (SP) foi estabelecido com base na gama de valores recomendados pelo fabricante (até 2,6% da massa total de sólidos), mantendo-se constante em todas as formulações. Critérios de sustentabilidade aliados a uma perspectiva de viabilidade económica sugerem que a adição de superplastificante deverá ser a menor possível desde que garanta as características mecânicas pretendidas. Avaliou-se o impacto da introdução de 0,25% de SP, verificando-se a redução do teor de água necessário para manutenção da trabalhabilidade das misturas. A introdução do SP e consequente diminuição do teor de água de amassadura melhora as propriedades mecânicas da argamassa TD25 (Figura 5.11).

Dado o impacto positivo registado pela adição de 0,25% de SP, fixou-se então este teor de adição em todas as formulações efetuadas tornando equiparável o seu comportamento mecânico e funcional.

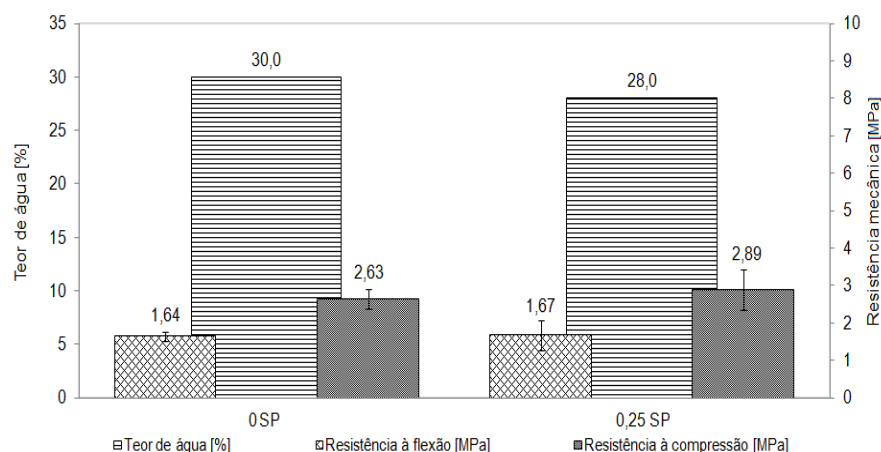


Figura 5.11: Impacto da introdução de superplastificante nas propriedades mecânicas da argamassa TD25.

Caracterização no estado fresco

Para garantir níveis de trabalhabilidade adequados, a argamassa TD25 requer um teor de água de amassadura de 28,0% juntamente com a adição de 0,25% de SP (Figura 5.11). Nestas condições o espalhamento foi de 150 mm. O tempo inicial e final de presa foi de aproximadamente 26 e 52 horas, respetivamente. A determinação destes valores permitirá, por comparação com tempos de presa de outras formulações, perceber o impacto da introdução de aditivos (nomeadamente agentes retentores de água) no processo de hidratação e consequentemente na taxa de reconstrução estrutural.

Para melhor compreensão das propriedades em fresco, realizaram-se ensaios de reologia, descritos em 5.2.5. Nesta secção é descrito e comparado o comportamento relógico da argamassa TD25 com uma formulação multifuncional projetada para satisfazer todos os requisitos funcionais propostos neste trabalho.

Caracterização no estado endurecido

A fina granulometria da argamassa TD25 possibilitou uma boa compactação dos seus constituintes, sendo expectável obter baixos valores de porosidade aberta e de absorção de água. Ensaio de absorção de água realizados em amostras contendo somente (como aditivo) 0,25% de SP e respeitando a trabalhabilidade pré-definida, revelaram valores de porosidade e absorção de água relativamente baixos (Figura 5.12).

A determinação da curva de absorção de água por capilaridade (Figura 5.13) e do respetivo coeficiente de capilaridade ($0,44 \text{ Kg/m}^2\sqrt{\text{min}}$) permitiu perceber que a argamassa TD25 excede o limite superior definido pela NP EN 998-1 para argamassas de uso geral ($0,40 \text{ Kg/m}^2\sqrt{\text{min}}$). Um coeficiente de capilaridade desta ordem afasta a possibilidade de utilização da argamassa TD25 como argamassa de acabamento, encontrando-se contudo, o valor do coeficiente de capilaridade

distante dos usualmente registados em argamassas de assentamento de alvenaria ($\simeq 0,95 \text{ Kg/m}^2\sqrt{\text{min}}$). A NP EN 998-1 prevê a possibilidade do limite superior do valor do coeficiente de capilaridade ser excedido em argamassas de uso geral, caso estas possuam uma camada de acabamento de outro material que lhe confira uma proteção adicional à sucção capilar. A argamassa TD25 apresenta valores de sucção capilar característicos de argamassas usadas maioritariamente como emboço.

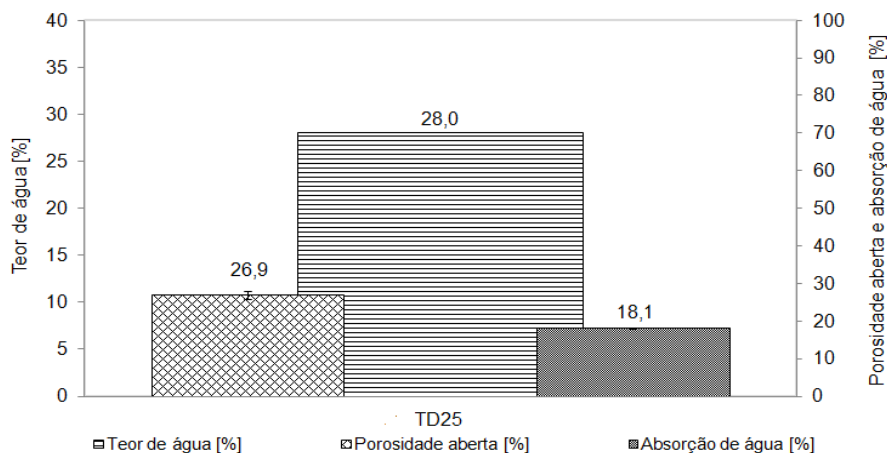


Figura 5.12: Teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água da argamassa TD25.

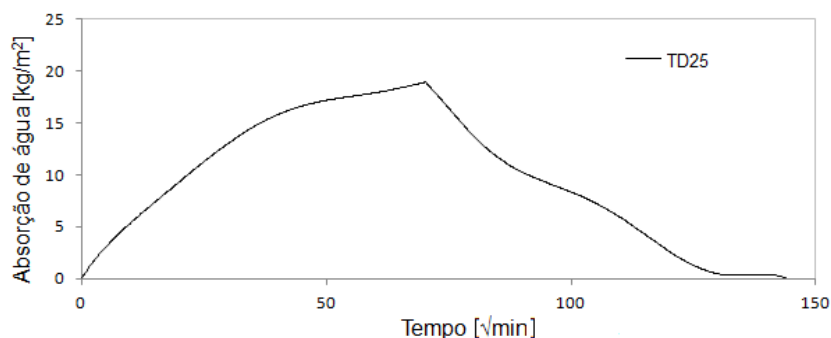


Figura 5.13: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade da argamassa TD25.

O presente trabalho desenvolveu formulações de argamassas multifuncionais, sendo o controlo higroscópico um dos principais aspetos considerados. Argamassas com elevados coeficientes de absorção e índices de secagem responderão rapidamente as alterações de humidade do meio envolvente.

O coeficiente de capilaridade depende diretamente do volume de poros abertos, mas é afetado pela geometria (área e volume) dessa mesma porosidade. Poros de menor raio provocam maior pressão de ascensão capilar, originando velocidades iniciais de absorção superiores. Por sua vez, poros de maior tamanho aumentam a quantidade de água absorvida mas com taxas de absorção inferiores [92].

A influência do raio dos poros na pressão de ascensão capilar condiciona portanto a cinética do processo de absorção capilar sendo expressa através da expressão:

$$P = \frac{2\Upsilon}{r} \quad (5.1)$$

onde:

- P -Pressão de ascensão capilar
- Υ -Tensão superficial
- r -Raio do poro

A Figura 5.14 estabelece a relação a entre a pressão de ascensão capilar e o raio do poro. A análise conjunta da Figura 5.14 e da curva de absorção por capilaridade (Figura 5.13) evidencia a existência de uma dimensão de poro relativamente homogênea, dada a manutenção da velocidade de absorção durante grande parte do processo de absorção de água por capilaridade.

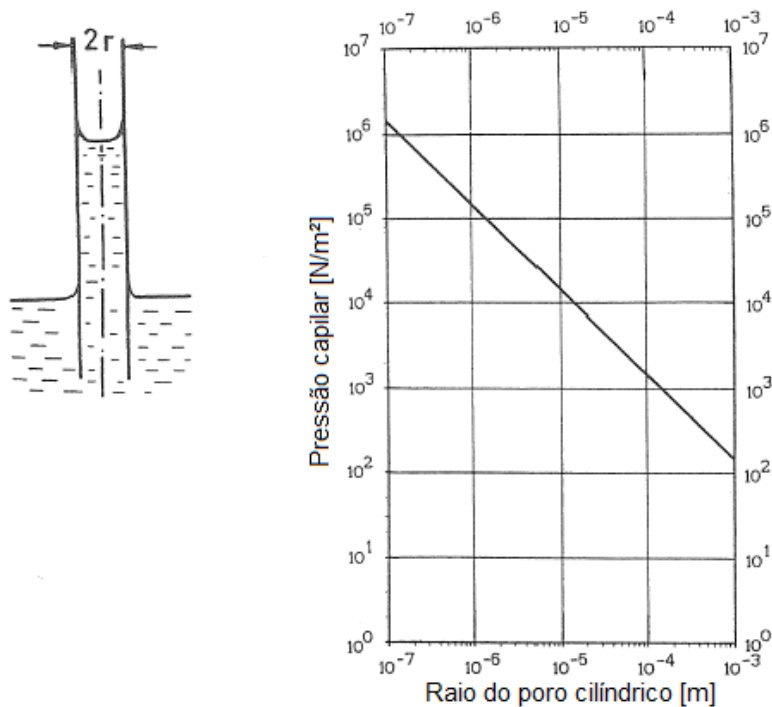


Figura 5.14: Correlação entre o raio do poro e pressão capilar.

O coeficiente de capilaridade denota a capacidade de absorção inicial quando a argamassa se encontra exposta a humedecimento, enquanto que o valor assintótico será representativo da quantidade máxima de água absorvida por capilaridade. O valor assintótico é diretamente proporcional à porosidade aberta do

material, pois tratando-se de um parâmetro atemporal, é independentemente da dimensão e forma dos poros. Este parâmetro é determinante no comportamento das argamassas quando expostas a prolongados períodos de humedecimento. A argamassa TD25 apresenta um valor assintótico de $18,98 \text{ Kg}/\text{m}^2$. Na Figura 5.13 é ainda possível observar o processo de secagem da amostra após a sua saturação. O comportamento das argamassas na fase de secagem adquire elevada importância no controlo higroscópico.

Flores-Colen *et al.* [93] propõe o valor de $0,2 \pm 0,02 \text{ Kg}/(\text{m}^2\text{h})$ como limite para o valor do índice de secagem de argamassas pré-doseadas com densidade aparente de $1550 \pm 50 \text{ Kg}/\text{m}^3$. A argamassa TD25 apesar de apresentar densidade aparente apenas ligeiramente inferior a $1550 \text{ Kg}/\text{m}^3$ (Figura 5.15) exibe um índice de secagem ($0,055 \text{ Kg}/(\text{m}^2\text{h})$) bastante inferior ao definido por estes autores. Estes autores referem ainda a existência duma relação direta entre a porosidade aberta e o índice de secagem, ou seja, materiais mais porosos apresentam índices de secagem superiores. Referem ainda que a presença de cal prolonga o período de secagem, reduzindo assim o respetivo índice.

O maior ou menor grau de interligação da rede porosa reflete-se não só no comportamento hidróscópico do material mas também nas características físicas e mecânicas da argamassa no estado endurecido. Uma menor porosidade da argamassa resultará no aumento da densidade aparente, do módulo de elasticidade e da resistência à compressão e flexão. A Figura 5.15 apresenta a densidade aparente e módulo de elasticidade da argamassa TD25. O valor de densidade aparente registado é superior ao indicado pelo fabricante ($1160 \text{ Kg}/\text{m}^3$) e está acima de $1300 \text{ Kg}/\text{m}^3$, não podendo ser classificada como argamassa leve segundo a NP EP 998-2 de 2013.

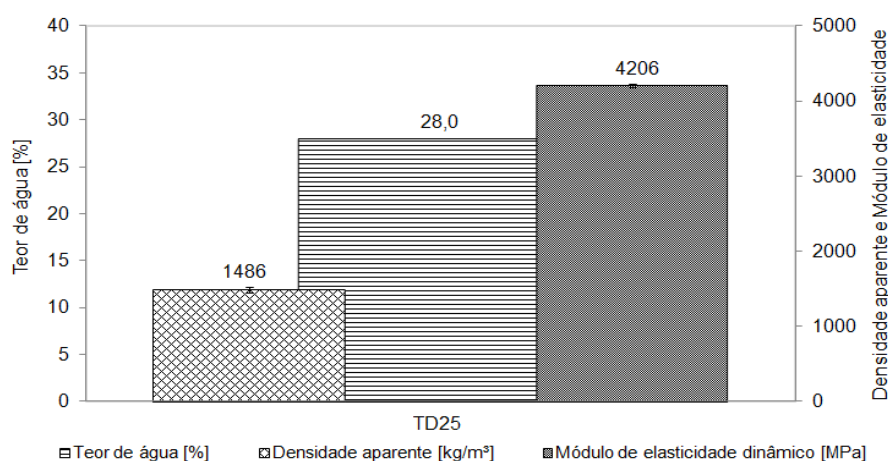


Figura 5.15: Teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade da argamassa TD25.

Como demonstrado na Figura 5.11 a argamassa TD25 apresenta uma resistência à compressão de $2,89 \text{ MPa}$ atingindo a classe de resistência M 2,5 segundo a EN NP 998-2 de 2013. A EN NP 998-2 não prescreve classes de resistência à flexão.

Ainda assim, a argamassa TD25 apresentou uma resistência à flexão superior a 1 *MPa*, valor considerado como referência em diversos trabalhos.

A introdução de aditivos com tamanho de partícula reduzido e/ou afinidade com moléculas de água irá originar um aumento da quantidade de água necessária para assegurar a trabalhabilidade pré-definida. O aumento do teor de água de amassadura poderá ter como consequência nefasta o surgimento de maiores retrações durante o processo de cura. Retrações excessivas poderão provocar fissuras na superfície do revestimento depois de aplicado. Sendo este fenómeno frequente, será comparado o surgimento de fissuras entre a argamassa TD25 e a formulação multiaditivada preparada. Esta comparação será realizada a três tempos de cura distintos, tentando-se registar eventuais alterações ao longo do tempo (ver 5.2.5). Determinou-se ainda a sua aderência ao suporte estando os resultados descritos e comparados com formulação multifuncional em 5.2.5.

Caracterização funcional

Modelação térmica

De forma a possuir uma base comparativa com as formulações posteriormente testadas, foi construído um protótipo com placas isolantes *XPS* revestido única e exclusivamente por argamassa TD25. Este protótipo foi submetido a ciclos térmicos, descritos em 4.1. A Figura 5.16 mostra os dois ciclos de variação de temperatura ao qual o protótipo referência foi sujeito e as temperaturas da atmosfera interna. De notar que o atraso térmico e a diferença entre a temperatura no interior e exterior do protótipo se deve à massa térmica deste e não à acumulação/libertação de calor latente. A introdução de aditivos com reduzido peso específico alterará a massa térmica das argamassas, porem estas alterações terão uma expressão diminuta, dado o volume de material analisado.

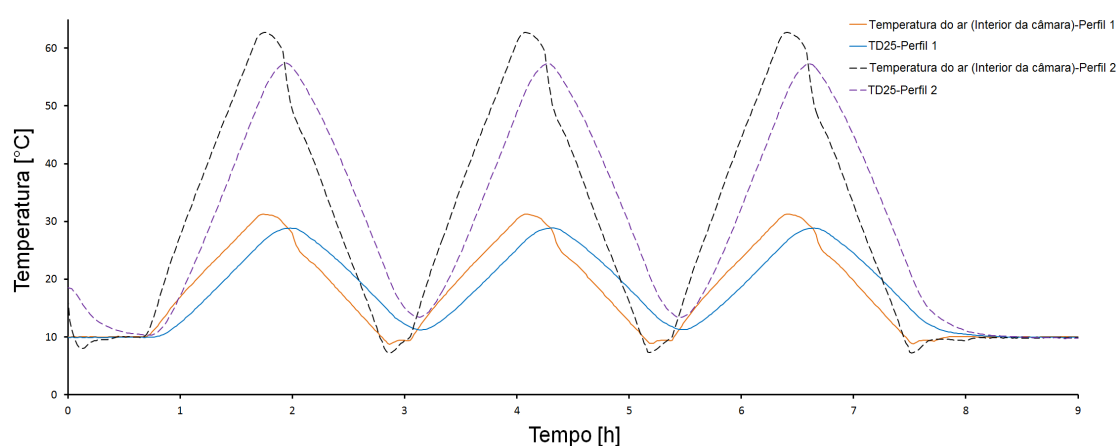


Figura 5.16: Ciclos térmicos e respetiva temperatura interna no protótipo revestido por argamassa TD25.

A alteração do teor de humidade afetará o comportamento térmico das arga-

massas alterando a sua condutividade térmica e, na presença de *PCM's*, a sua entalpia de fusão (ver 3.1). No caso da argamassa TD25 registaram-se alterações no comportamento térmico com o aumento do teor de humidade relativa na atmosfera circundante. Esta alteração reflete a substituição de parte do ar presente na estrutura porosa da argamassa por água, aumentando a condutividade térmica.

Na Figura 5.17 pode ver-se o aumento da temperatura máxima registada no protótipo durante a fase de aquecimento com o aumento da humidade relativa.

O aumento da condutividade repercutir-se-á também na fase de arrefecimento.

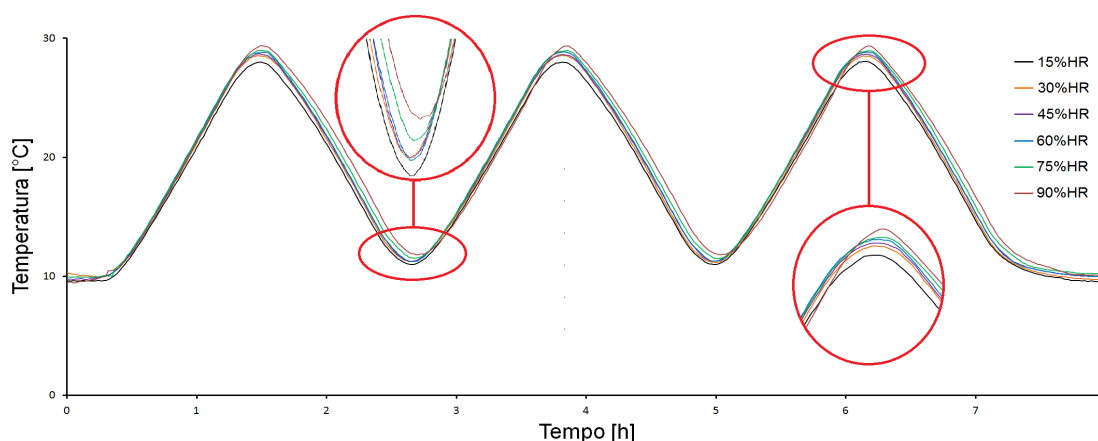


Figura 5.17: Temperatura interna no protótipo revestido por argamassa TD25 durante ciclos com diferentes %HR.

Embora numa primeira fase de análise poder-se ponderar a existência de outro(s) fenómeno(s) dada a menor temperatura registada no interior do protótipo com o aumento do teor de humidade relativa, facto é que, para as mesmas condições externas e ponderando a temperatura inicial da atmosfera no interior do protótipo na fase de arrefecimento, regista-se uma maior diminuição da temperatura com o aumento do teor de humidade relativa (Figura 5.18). Desta forma, demonstra-se o impacto do teor de humidade relativa da envolvente no desempenho térmico das argamassas.

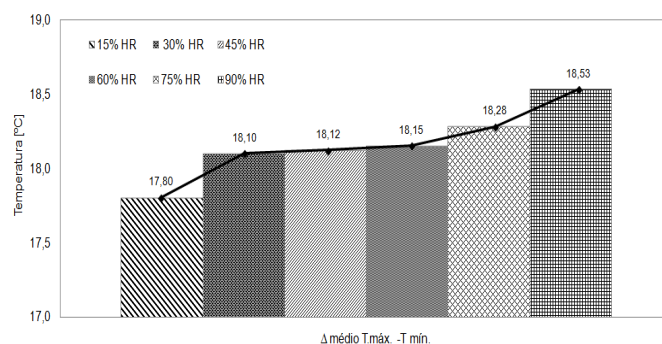


Figura 5.18: Diminuição da temperatura interna no protótipo revestido por argamassa TD25 durante a fase de arrefecimento.

Atividade fotocatalítica

Apesar da argamassa TD25 não ter sido formulada para ter um papel relevante na descontaminação ambiental efetuou-se ensaios de degradação de NO_x nas condições já descritas. Os resultados obtidos permitiram quantificar a diminuição da concentração de NO_x no interior do reator sendo posteriormente usados como referência. A Figura 5.19 revela que apesar de existir a diminuição da concentração de NO_x , esta é de tal ordem diminuta que não será resultado de processos de degradação fotocatalítica. Apesar de ter sido considerado um período de estabilização da concentração de NO_x , tentando garantir a saturação da amostra e do reator, a porosidade das amostras poderá resultar num período de saturação bastante alargado. Desta forma, a redução da concentração de poluente registada poderá ser consequência de absorção e não da degradação de NO_x . A maior rapidez com que se atingiu a estabilização da concentração de NO_x quando a argamassa TD25 se encontra exposta a irradiação exclusivamente do espectro visível indica que o efeito da exposição do NO_x a radiação UV poderá também contribuir para a diminuição da concentração no interior da atmosfera.

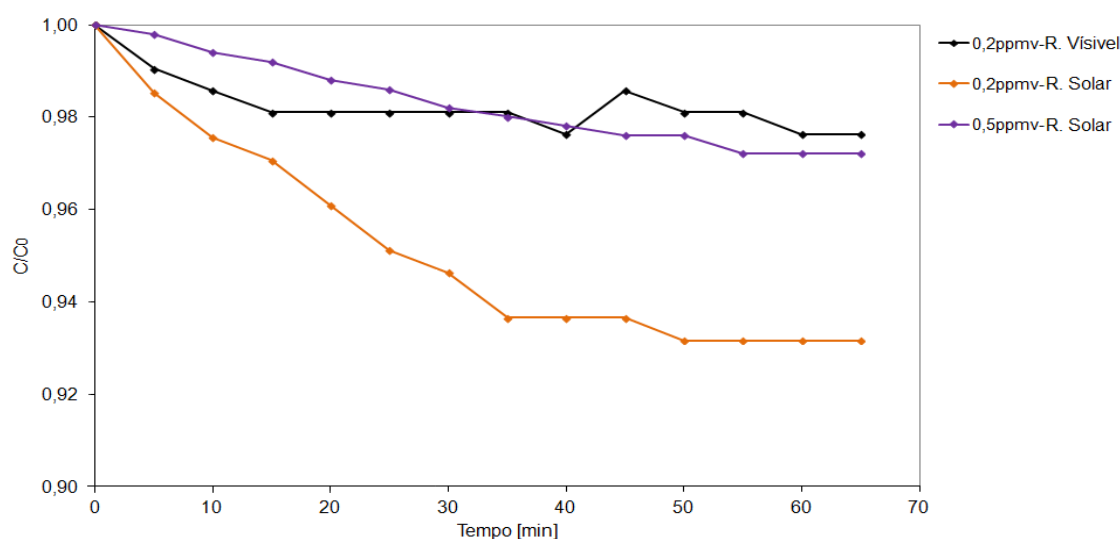


Figura 5.19: Diminuição da concentração de NO_x no interior do reator com argamassa TD25.

Apesar da semiquantificação por EDS dos elementos presentes na argamassa TD25 confirmar a existência de algum dióxido de titânio na sua composição (percentagem do elemento aproximadamente 2,6% da amostra analisada) (Figura 5.20) a diminuição da concentração de NO_x não indica a existência de processos de degradação fotocatalítica.

A presença de TiO_2 na forma cristalina de rutilo é usual em argamassas. O TiO_2 sob a sua forma cristalina pura de rutilo não atua como agente de fotodegradação de compostos orgânicos, sendo usualmente adicionado por razões estéticas, funcionando como pigmento branco.

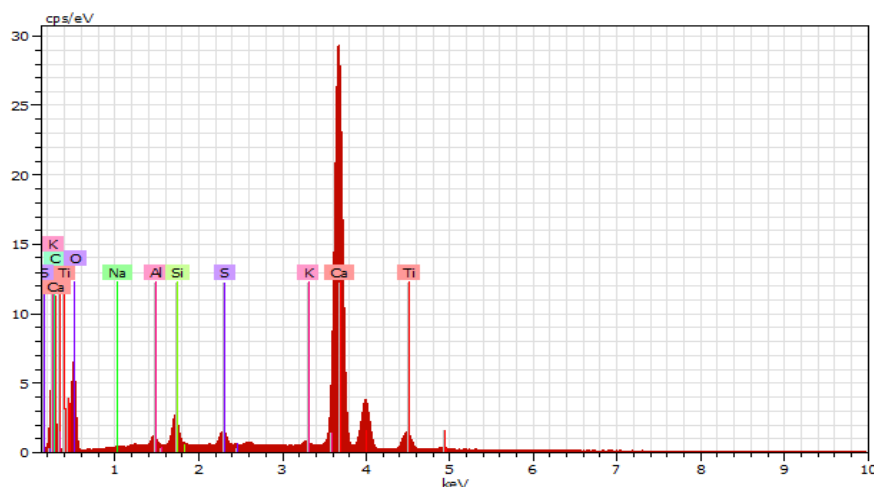


Figura 5.20: Semiquantificação por EDS de elementos presentes na superfície da argamassa TD25.

Comportamento higroscópico

Segundo a metodologia *NordTest* a argamassa TD25 apresenta um valor de *MBV* prático de $1,27 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%HR)@8/16h$, obtendo a classificação de "Bom". A granulometria da argamassa e o teor de água de amassadura utilizado na sua preparação originou a formação de uma rede porosa que possibilita fixação e libertação de humidade.

O valor de *MBV* pondera a capacidade de absorção e libertação média ao longo de quatro ciclos de variação de humidade relativa, porém a análise das linhas de tendência dos valores de massa máxima e mínima permite conhecer a velocidade de absorção e libertação de água e a repetição cíclica da capacidade higroscópica da argamassa em causa.

É observável a diminuição da capacidade higroscópica ao longo das repetições dos ciclos de variação de humidade relativa resultante da aproximação das retas de tendência de massa mínima e máxima da amostra (Figura 5.21). A presença de algum teor de água na estrutura porosa da argamassa aquando do início do ensaio condiciona a absorção de água. Nos ciclos iniciais a capacidade de dessorção é superior, registando-se uma diminuição contínua da massa de água libertada (Tabela 5.2). Também fenómenos de histerese poderão desempenhar um papel relevante no comportamento higroscópico demonstrado pela argamassa TD25. A prolongada curva de dessorção de água verificada na Figura 5.13 corrobora a dificuldade de dessorção de água da argamassa TD25. A existência de uma rede porosa homogénea maioritariamente constituída por poros de dimensões diminutas poderá explicar a inferência de fenómenos de histerese no desempenho higroscópico da argamassa TD25.

Os sucessivos ciclos de absorção/libertação de água a que a argamassa TD25 foi submetida tendem a anular o efeito da presença de água na amostra no início do ensaio *NordTest*. A presença de algum teor de água nas amostras dever-se-á às

condições de acondicionamento das mesmas (20°C e 65%HR), possibilitando o teor de humidade relativa a fixação de alguma água na estrutura porosa da argamassa. A metodologia *NordTest* não indica a necessidade da prévia secagem das amostras, porém a norma ISO 12571: *Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of hygroscopic sorption properties*, publicada no decorrer do presente trabalho, já preconiza essa necessidade.

Perante os ciclos prescritos (que não são reais) as amostras tendem a saturar, uma vez que a taxa de dessorção é superior à taxa de absorção. Desta forma será necessário alterar as condições a que a argamassa se encontra exposta prolongando a fase de secagem ou reduzindo os teores de humidade relativa.

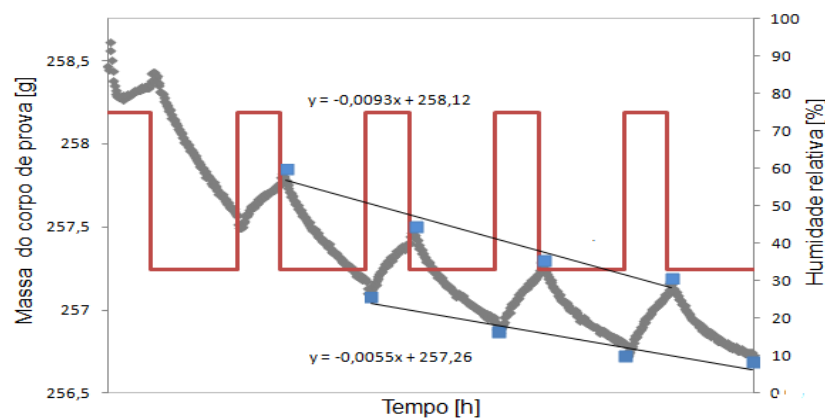


Figura 5.21: Variação da massa da argamassa TD25 registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

Tabela 5.2: Massa de água absorvida e libertada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo a metodologia *NordTest* e valor de *MBV* da argamassa TD25.

Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ%HR]
1	0,46	0,85	1,27
2	0,49	0,70	
3	0,49	0,63	
4	0,52	0,56	

A determinação exata do valor de *MBV* requererá a análise do comportamento higroscópico das formulações num maior número de ciclos de variação de humidade relativa para assim se compreender o real impacto na modelação higroscópica de edifícios.

5.2.2 Argamassas com *PCM*'s

Com base na literatura estabeleceu-se o teor de adição de 20% de *PCM*, considerado ótimo em argamassas de cal e mistas [64]. A formulação contendo 20% de *PCM* será doravante denominada de A20P. O teor de água de amassadura desta formulação foi ajustado pretendendo satisfazer o espalhamento definido.

A fina granulometria do *PCM* confere-lhe uma elevada área superficial. Quando adicionado em grandes quantidades (20%) na matriz da argamassa TD25, o *PCM* provoca uma acentuada redução da água livre que se sobrepõe ao efeito da sua esfericidade na fluidez do amassado. Desta forma, é necessário um aumento significativo do teor de água de amassadura para obter iguais valores de espalhamento (Figura 5.22).

Caracterização no estado endurecido

O aumento do teor de água de amassadura reduz a densidade aparente da argamassa aos 28 dias de cura, relativamente à argamassa TD25. A alteração da relação sólidos/líquidos afeta de forma direta a densidade aparente da argamassa. Na Figura 5.22 é observável a relação entre a densidade aparente da argamassa e o teor de água de amassadura.

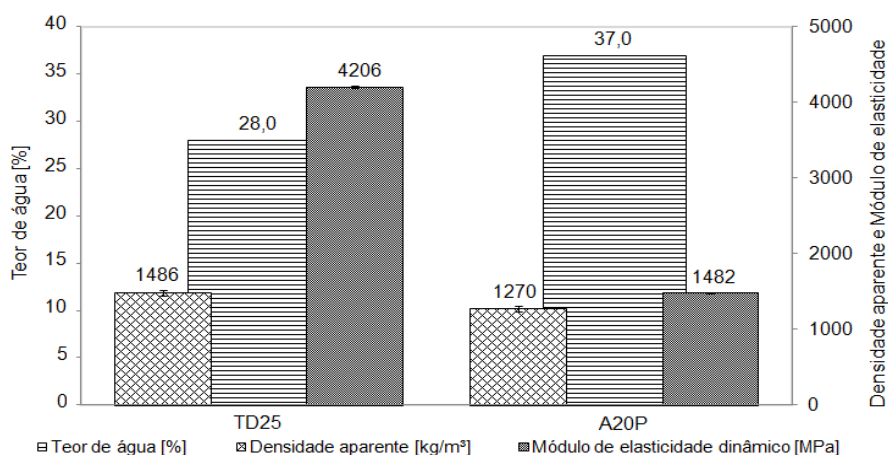


Figura 5.22: Evolução do teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade com a adição de *PCM*.

O menor valor do módulo de elasticidade dinâmico, ou seja, a menor rigidez da argamassa A20P resulta do aumento da porosidade aberta e menor densidade aparente dos corpos de prova. Na Figura 5.23 pode-se constatar o aumento de $\simeq 10\%$ da porosidade aberta e conseqüente aumento de $\simeq 29\%$ da quantidade de água absorvida.

O aumento do teor de água de amassadura altera não só o volume de poros existentes na estrutura da argamassa mas também a geometria dos poros interligados existentes.

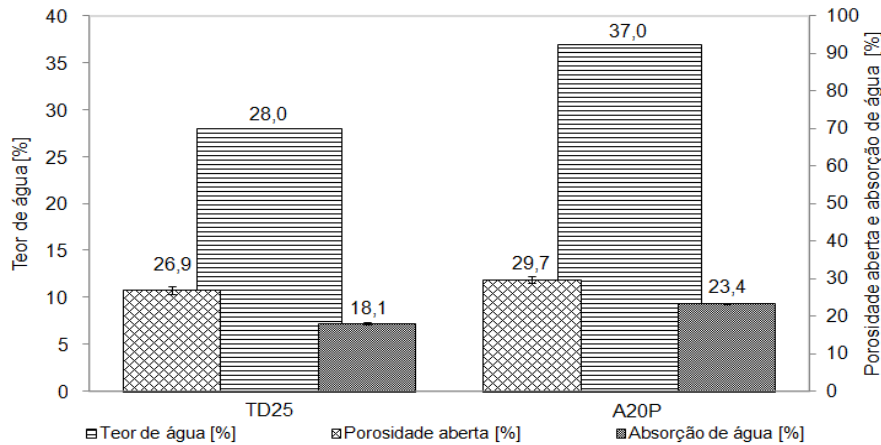


Figura 5.23: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição de *PCM*.

O coeficiente de absorção de água e o valor assintótico por capilaridade confirmam a diferença entre as estruturas capilares das argamassas TD25 e A20P. Apesar da ligeiramente maior porosidade aberta da argamassa A20P, e consequente aumento do valor assintótico (Tabela 5.3), são também visíveis alterações a nível da estrutura porosa através da análise da curva de absorção de água por capilaridade (Figura 5.24). O maior valor do coeficiente da absorção de água por capilaridade da argamassa A20P ($C_c=0,95 \text{ Kg/m}^2\sqrt{\text{min}}$) revela uma maior rapidez de absorção capilar na fase inicial do processo, sendo tal facto, indicador de uma menor dimensão média dos poros existentes. Regista-se também o aumento do índice de secagem relativamente à argamassa TD25 (Tabela 5.3). Deste modo, a introdução de 20% *PCM* aumentará a taxa global de secagem. São portanto expectáveis tempos de resposta menores às alterações do teor de humidade relativa do meio envolvente, beneficiando a eficácia no controlo higroscópico da argamassa.

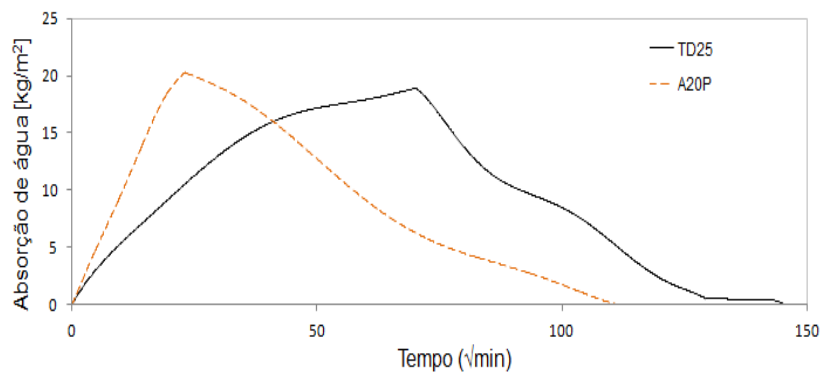


Figura 5.24: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade das argamassas TD25 e A20P.

Tabela 5.3: Impacto da adição de *PCM* no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A20P	0,95	20,23	0,103

A diminuição da densidade e rigidez originada pela introdução de 20% de *PCM* tem impacto evidente nas características da argamassa reduzindo o seu desempenho mecânico (Figura 5.25). Tais alterações são reflexo da necessidade do aumento do teor de água de amassadura de forma a garantir igual trabalhabilidade. De notar ainda a concordância existente entre estes resultados e o descrito na bibliografia [64].

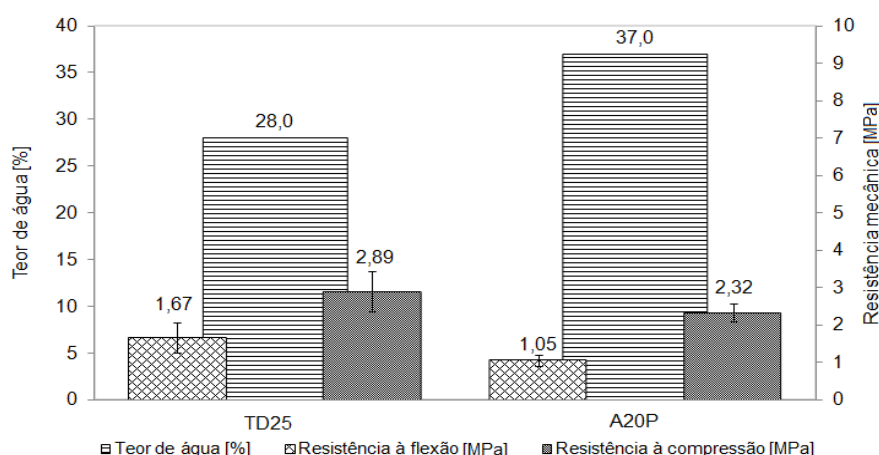


Figura 5.25: Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de *PCM*.

A elevada quantidade de água livre, ou seja, que não foi comprometida no processo de hidratação da argamassa A20P tende a ser removida por secagem, originando perda de massa e retração. O processo de libertação de água relaciona-se diretamente com o teor de água de amassadura e com a capacidade de absorção de humidade, encontrando-se geralmente concluído no final do sétimo dia de cura. No caso de formulações especialmente desenhadas para controlo higroscópico esta tendência sofrerá uma inversão, registando-se a partir do término do processo de cura um aumento da massa dos corpos de prova.

Não foi aferido o comportamento higroscópico da argamassa A20P através da metodologia *NordTest*, tendo-se usado a variação de massa entre o vigésimo primeiro e vigésimo oitavo dia de cura como indicador da capacidade higroscópica. Estes valores foram comparados com o registado na argamassa TD25.

Os corpos de prova da argamassa TD25 exibiram um aumento de massa de

0,07% entre o vigésimo primeiro e oitavo dia de cura enquanto que os de argamassa A20P registaram um acréscimo de massa de 0,12%. Desta forma, a argamassa A20P apresenta indicadores de uma melhor performance na modelação higroscópica relativamente à argamassa TD25. O maior acréscimo de massa dos corpos de prova da formulação A20P tem origem na maior porosidade aberta e capacidade de absorção de água que estes possuem. A caracterização funcional das formulações multifuncionais contendo *PCM* será apresentada em 5.2.5.

Caracterização funcional

Modelação térmica

A avaliação de desempenho térmico efetuou-se segundo o descrito em 4.1. Numa fase preliminar aplicou-se uma camada de 3 *mm* de espessura sobre um cerâmico monoporoso da argamassa A20P e da argamassa TD25. Estes corpos de prova, após 28 dias cura em condições controladas, foram colocados numa placa de aquecimento a temperatura constante e igual entre ensaios, registando-se, através de uma câmara fototérmica FTIR, a evolução da temperatura na face oposta à aquecida a cada 5 minutos. Este ensaio de fácil execução forneceu indicadores das diferenças térmicas entre as amostras. Na amostra A20P registaram-se temperaturas inferiores, indicando um efeito benéfico da adição de *PCM* (Figura 5.26).

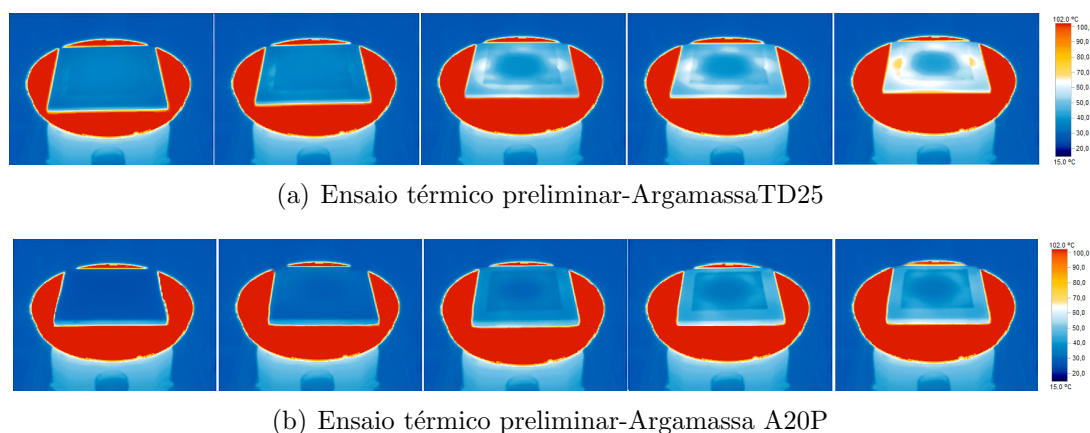


Figura 5.26: Evolução térmica da superfície do corpo a cada 5 minutos.

Para quantificar numericamente o desempenho térmico da adição de 20% de *PCM* na argamassa TD25, foi elaborado um protótipo com placas *XPS*, revestido com argamassa A20P, comparando-se os resultados com os já descritos em 5.2.1.

Os protótipos foram sujeitos a oscilações térmicas comuns numa habitação de acordo perfil 1 de temperaturas descrito em 4.1, mantendo-se o teor de humidade relativa constante (60% HR). Estabeleceu-se um patamar inicial de 40 minutos para estabilização da temperatura na câmara climática e no interior dos protótipos.

O impacto na atmosfera existente no interior dos protótipos resultante da adição de 20% de *PCM* torna-se evidente em toda a fase de aquecimento, ocor-

rendo uma diminuição da temperatura registada. Esta diminuição é progressiva, sendo máxima no ponto de temperatura mais elevada. Na fase de arrefecimento, para temperaturas inferiores a $\sim 25^{\circ}\text{C}$, ou seja imediatamente após o momento de transição de fase, o protótipo revestido com argamassa A20P registou temperaturas superiores às registadas com a argamassa referência (Figura 5.27).

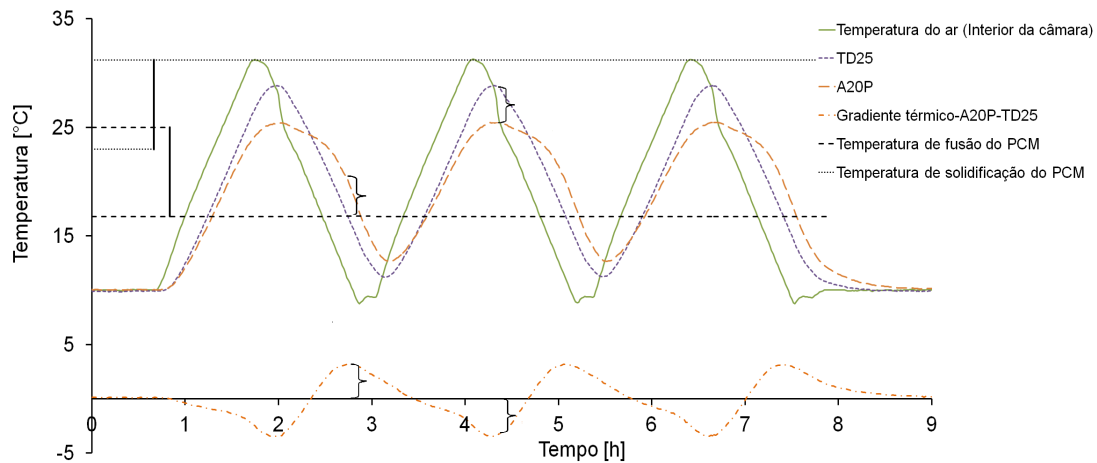


Figura 5.27: Variação da temperatura na câmara climática e no interior dos protótipos e gradiente térmico em função de tempo durante o ensaio térmico segundo o perfil de temperaturas 1.

Com a introdução de *PCM* verificou-se a diminuição de $3,4^{\circ}\text{C}$ na temperatura máxima, correspondendo a uma redução de 12%. A adição de *PCM* não resultou num atraso térmico considerável ($\simeq 2$ minutos). Na fase de arrefecimento a temperatura mínima atingida sofreu um acréscimo de $1,4^{\circ}\text{C}$, ou seja, um aumento na ordem dos 13%. O gradiente térmico registado sofreu uma redução de $4,8^{\circ}\text{C}$ (-27%) com a introdução de 20% de *PCM* na formulação da argamassa TD25.

A diferença de temperaturas analisada em função do tempo revela diferenças máximas de temperatura entre os protótipos na fase de aquecimento de $3,5^{\circ}\text{C}$, sendo de $3,2^{\circ}\text{C}$ na fase de arrefecimento (Figura 5.28).

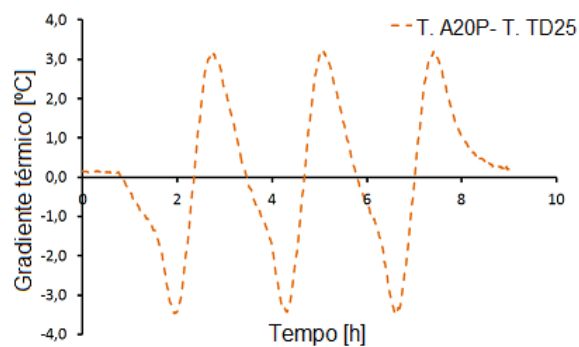


Figura 5.28: Gradiente térmico entre protótipo TD25 e A20P em função do tempo durante o ensaio térmico segundo o perfil de temperaturas 1.

Como demonstrado por Novais *et al.* [26] a condutividade térmica do *PCM* diminui quando este solidifica, resultando em diferentes impactos da adição de 20% de *PCM* na temperatura máxima e mínima registada. A transição de fase é identificável na Figura 5.28 nos pontos de inflexão durante a fase de aquecimento e arrefecimento.

Na fase de aquecimento a diferença máxima de temperaturas em função do tempo não difere significativamente da diferença máxima obtida.

O aumento da temperatura mínima é menor que a diferença máxima registada na fase de arrefecimento entre os protótipos TD25 e A20P. Este facto indica que a adição de *PCM* exerce maior impacto na modelação térmica numa gama de temperaturas próximas da temperatura de transição de fase, diminuindo-se tal efeito com o afastamento da temperatura da zona de transição de fase. O desfasamento entre a temperatura de transição de fase do *PCM* na fase de aquecimento e a temperatura máxima do ciclo (7°C) é bastante distinto da diferença entre o ponto de transição do *PCM* na fase de arrefecimento e a temperatura mínima a que os protótipos se encontram sujeitos (15°C). Desta forma, verifica-se uma redução do efeito térmico da adição de *PCM* na fase de arrefecimento, tendendo o comportamento térmico do protótipo A20P a aproximar-se do protótipo referência. De notar ainda a não existência de atraso térmico no ponto de temperatura mínima.

Sobrepondo a informação relativa à variação da temperatura no interior dos protótipos e a diferença de temperatura entre protótipos em função do tempo, facilmente se observa que, avaliado em condições iguais, ou seja pontos onde a diferença entre a temperatura máxima e ponto de fusão do *PCM* e a diferença entre a temperatura mínima e ponto de solidificação do *PCM* sejam iguais, o diferencial térmico entre protótipos terá igual valor quer na fase de aquecimento quer na fase arrefecimento (Figura 5.27).

A tendência do efeito térmico do *PCM* se suavizar com o afastamento entre a temperatura da envolvente e a temperatura de transição de fase permite estabelecer uma relação entre o gradiente térmico do meio envolvente e o desempenho do material na modelação térmica do meio.

Para verificar tal tendência e aferir o impacto na eficiência e aplicabilidade da argamassa A20P em climas mais severos, onde o gradiente térmico é superior, testaram-se os protótipos perante um ciclo de temperaturas (definido em 4.1 como perfil 2) onde foi mantida como temperatura mínima 10°C, aumentado-se a temperatura máxima para 60°C. Apesar do ciclo de temperaturas definido ser de tal ordem extremo que dificilmente se equipará a condições reais de aplicação da argamassa, possibilitará a compreensão da influência da temperatura da envolvente no desempenho térmico do material. Desta forma, teremos uma diferença entre a temperatura de fusão do *PCM* e a temperatura máxima da envolvente de 37°C, enquanto essa diferença na fase de arrefecimento será mantida em 15°C. O teor de humidade relativa no interior da câmara manteve-se constante (60%) mantendo-se o patamar de estabilização de 40 minutos (Figura 5.29).

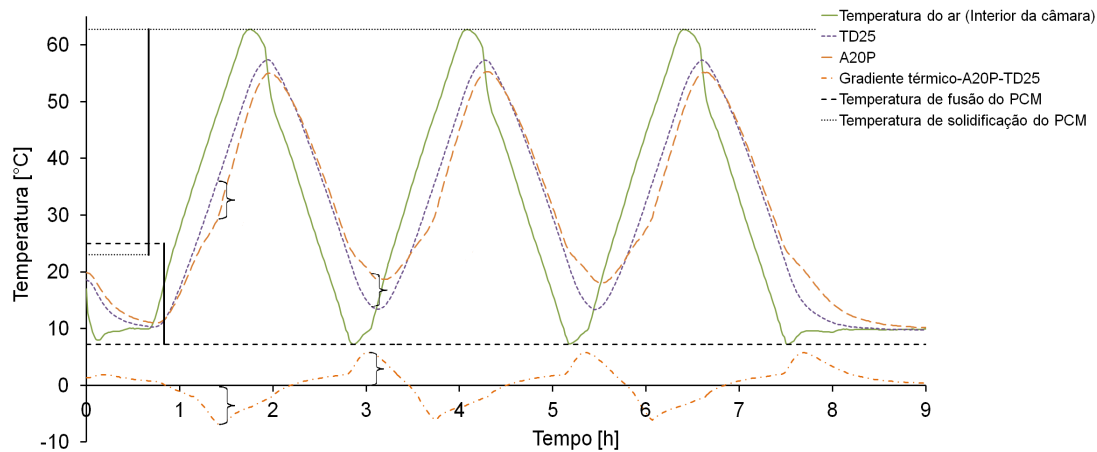


Figura 5.29: Variação da temperatura na câmara climática e no interior dos protótipos e gradiente térmico em função de tempo durante o ensaio térmico segundo o perfil de temperaturas 2.

Verifica-se uma redução da temperatura constante em toda a fase de aquecimento, sendo mais notória para temperaturas inferiores a 40°C . Para temperaturas superiores a este valor o efeito do *PCM* tende a desvanecer-se, aproximando-se as temperaturas das registadas no protótipo referência.

Registou-se a diminuição de $2,1^{\circ}\text{C}$ da temperatura máxima atingida no interior do protótipo com argamassa A20P representando uma redução de 4% relativamente à referência. A diferença máxima de temperatura registada na fase de aquecimento entre os protótipos TD25 e A20P foi de $7,1^{\circ}\text{C}$. Confirma-se portanto a redução do impacto térmico da adição de *PCM* como o afastamento da temperatura máxima do meio da temperatura de fusão do *PCM* (Figura 5.29).

Na fase de arrefecimento a temperatura mínima atingida sofreu um acréscimo de $4,7^{\circ}\text{C}$, ou seja, um aumento na ordem dos 35% em comparação com a referência. A diferença máxima registada entre os protótipos durante a fase de arrefecimento do ciclo de variação de temperatura foi de $5,8^{\circ}\text{C}$. No ensaio experimental descrito o gradiente térmico sofreu uma redução de $6,8^{\circ}\text{C}$ (-15%).

Mostra-se assim que as condições de serviço afetam a performance do *PCM* sendo a diferença entre a temperatura de transição de fase e as temperatura máxima e mínima do meio o fator dominante. A argamassa A20P demonstrou na fase de aquecimento ter a capacidade de redução de 14°C face à temperatura da referência quando a diferença entre a temperatura meio e a temperatura de fusão do *PCM* é de aproximadamente 25°C .

Este resultado indica que o protótipo A20P poderá ter a capacidade de reduzir em 7°C o gradiente térmico, caso a temperatura mínima da envolvente seja inferior. A verificação experimental desta hipótese não foi possível uma vez que o equipamento disponível não permite atingir temperaturas inferiores a 10°C , sem variação simultânea da humidade relativa. Apesar de, com este perfil térmico, o aumento da temperatura mínima e a diminuição da temperatura máxima ser superior em

valores absolutos, as alterações são percentualmente inferiores às observadas no ciclo de variação de temperatura 1.

Para avaliar o efeito da humidade relativa na modelação térmica usou-se o ciclo térmico 1, fazendo-se variar a humidade relativa do meio envolvente. Adotou-se o valor inicial 15%, aumentando-se sucessivamente o valor em intervalos de 15%, à semelhança do já testado no protótipo TD25.

Como se constata na Figura 5.30, a variação do teor de humidade relativa altera o desempenho térmico da argamassa com *PCM*. O aumento do teor de humidade diminui a entalpia de fusão do *PCM* reduzindo a sua capacidade de retenção de energia térmica [94]. Por outro lado, a moderada capacidade higroscópica da argamassa permite a retenção de alguma humidade nos seus poros. A substituição de parte do ar na estrutura porosa da argamassa por moléculas de água aumenta a condutividade térmica do material. O aumento da condutividade térmica é um efeito não desejável na construção de materiais destinados ao isolamento térmico porém na argamassa A20P este efeito permite que *PCM* acumule calor latente mais rapidamente.

Estes efeitos complexos parecem tender a anular-se, convergindo para um ponto de desempenho ótimo da argamassa A20P quando a humidade relativa se situa próxima dos 60%. Apesar de plausível, as diferenças registadas são mínimas não se podendo desprezar o erro experimental associado (Figura 5.30).

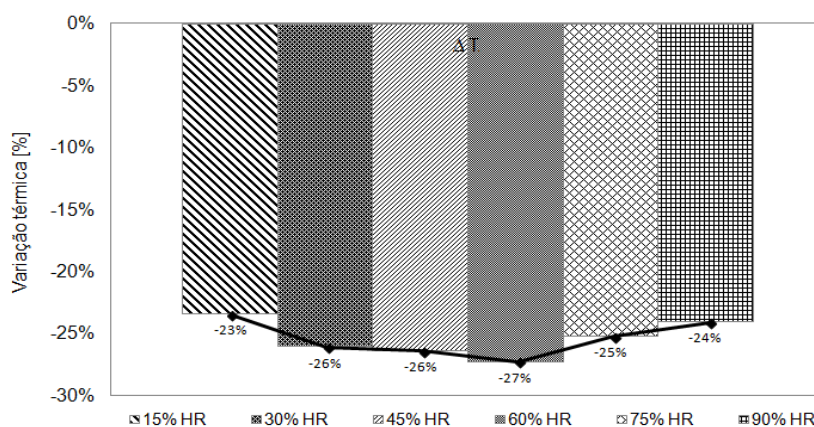


Figura 5.30: Variação do impacto térmico da introdução de *PCM* na argamassa TD25 em função do teor de humidade relativa.

5.2.3 Argamassas fotocatalíticas

Para cada formulação o teor de água de amassadura foi ajustado procurando manter a fluidez do amassado, compensando o sequestro de água livre pelas finas de partículas de TiO_2 (Figura 5.31). As formulações resultantes da adição de 1; 2 e 4% de TiO_2 à argamassa TD25 serão doravante designadas por A1nT, A2nT e A4nT, respetivamente.

Caracterização no estado endurecido

O aumento do teor de água de amassadura origina, após cura, uma estrutura da argamassa mais porosa e, conseqüentemente, com maior capacidade de absorção de água (Figura 5.31).

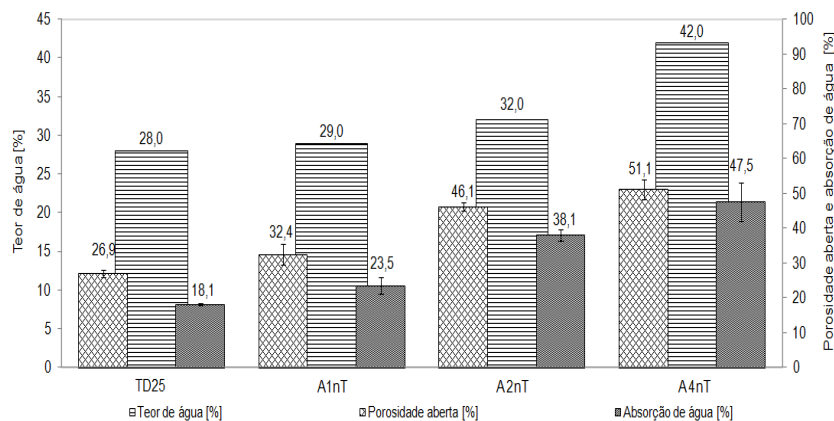


Figura 5.31: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água nas argamassas com TiO_2 .

De forma análoga à introdução de *PCM*, o aumento da porosidade resultante da adição de partículas de TiO_2 reduz a densidade aparente e o módulo de elasticidade dinâmico do material após 28 dias de cura (Figura 5.32).

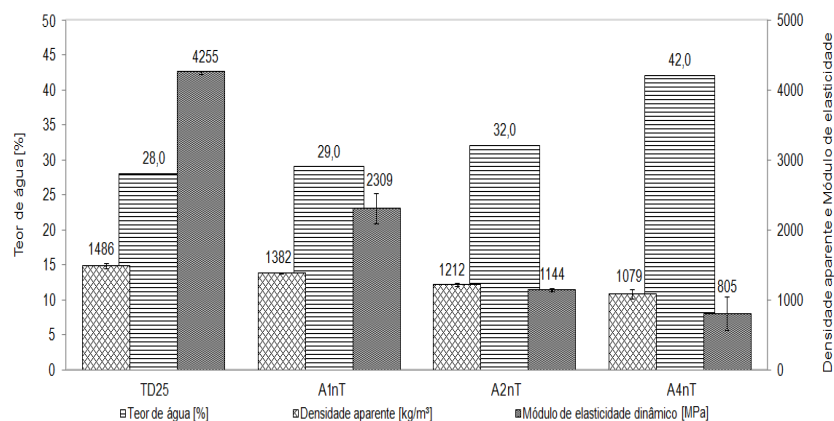


Figura 5.32: Evolução do teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade nas argamassas com TiO_2 .

A adição de TiO_2 prolonga o processo de hidratação e cura das argamassas tendo-se registado uma diminuição de massa (2 a 4%) proporcional à percentagem de adição de TiO_2 entre o vigésimo primeiro e vigésimo oitavo dia de cura. Este fenómeno indica que o processo de abandono da água livre não comprometida no processo de hidratação ainda decorre, contrariamente ao que sucedia na argamassa TD25.

O ensaio de absorção de água por capilaridade demonstra a cinética do processo de absorção e dessorção de água das formulações contendo TiO_2 . A adição de TiO_2 alterará, não só o volume de poros existentes na argamassa como também a sua geometria (tamanho e forma).

A adição de TiO_2 aumenta a velocidade inicial de absorção de água das argamassas. Com exceção de A1nT, o valor assintótico também aumenta, traduzindo a superior quantidade máxima de água absorvida (Figura 5.33).

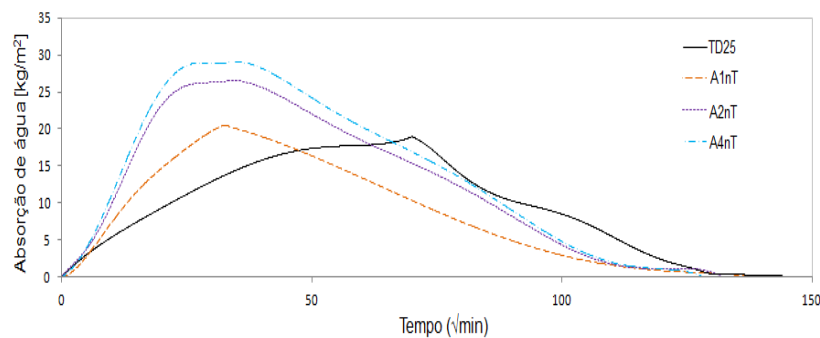


Figura 5.33: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade da argamassa TD25 e das argamassas com TiO_2 .

A dimensão reduzida dos aglomerados de TiO_2 ($1,7 \mu m$) [64] permite que estes reduzam a dimensão dos maiores poros existentes no material. Na Figura 5.34 é possível observar a alteração na microestrutura e porosidade da argamassa com a introdução de diferentes quantidades de TiO_2 , confirmando-se o preenchimento dos poros de maior dimensão. A maior pressão de ascensão capilar dos poros de menor raio resulta no aumento significativo do coeficiente de capilaridade que toma em consideração os primeiros 90 minutos de absorção capilar (Tabela 5.4).

A estrutura porosa das argamassas A1nT, A2nT e A4nT confere-lhes uma velocidade de absorção durante a fase inicial do processo bastante regular indicando a diminuição da dispersão do volume dos poros presentes nas argamassas contendo TiO_2 . Comparativamente com a argamassa TD25 regista-se o aumento do índice de secagem, revelando uma dessorção gradualmente mais rápida com a introdução de diferentes quantidades de TiO_2 .

Tabela 5.4: Impacto da adição de TiO_2 no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A1nT	0,85	20,50	0,371
A2nT	1,18	26,55	0,386
A4nT	1,29	29,21	0,395

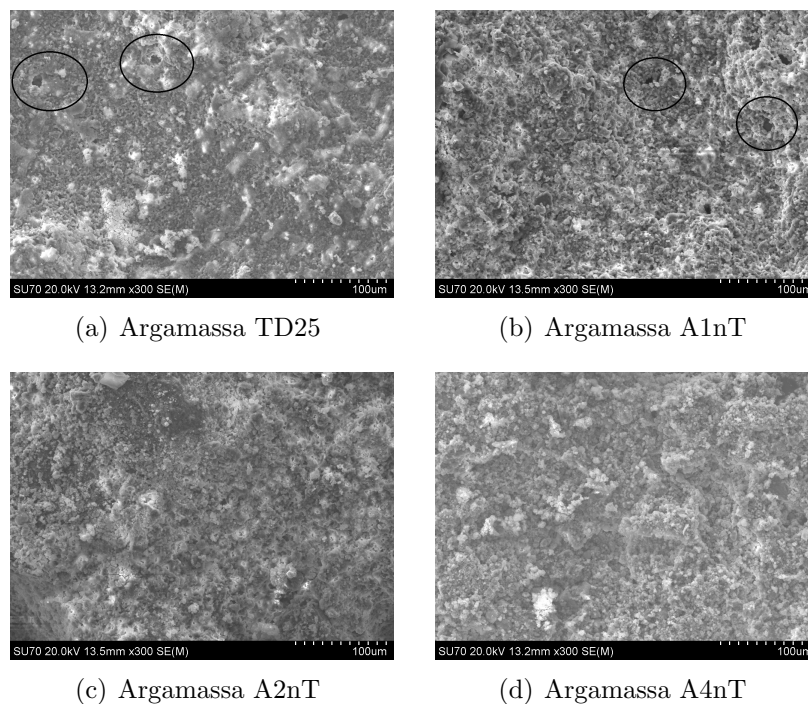


Figura 5.34: Alteração da microestrutura com a adição de diferentes quantidade de TiO_2 .

Relativamente à afetação das propriedades mecânicas da argamassa TD25 pela adição de TiO_2 , existe uma clara correlação entre o aumento da quantidade de TiO_2 e o decréscimo da resistência mecânica (Figura 5.35). A introdução de um material de baixa granulometria poderia representar um aumento da coesão da argamassa sendo expectável a melhoria das suas propriedades mecânicas, porém este efeito é anulado pela necessidade de aumentar o teor de água de amassadura.

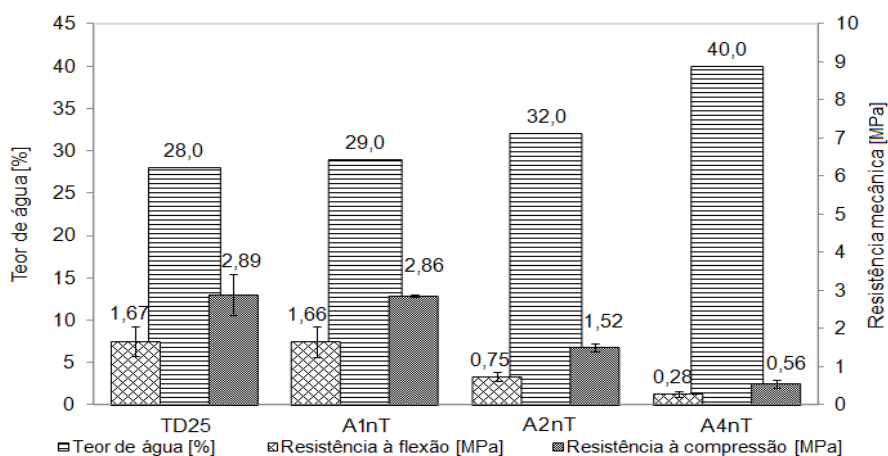


Figura 5.35: Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de TiO_2 .

Caracterização funcional

Atividade fotocatalítica

Pretendendo-se simular condições de ambiente interior, usando-se radiação visível artificial, aferiu-se a atividade fotocatalítica da argamassas preparadas. A concentração de poluente mantida no interior do reator foi de 0,2 ppmv.

Sob radiação visível a adição de TiO_2 não confere significativa capacidade de degradação fotocatalítica à argamassa TD25, tendo sido a taxa de conversão total de NO_x semelhante à amostra de referência ($\simeq 2,5\%$). A degradação de NO_x registada não é significativa, demonstrando-se a diminuta reatividade à região visível espectro do TiO_2 utilizado no presente trabalho. Os resultados obtidos permitem descartar a possibilidade de utilização da argamassa TD25 aditivada de percentagens iguais ou inferiores a 4% de TiO_2 em aplicações destinadas a ambientes interiores, sendo que teores de adição superiores conduzem a uma elevada deterioração das propriedades mecânicas das argamassas.

Para analisar a atividade fotocatalítica das formulações quando expostas a radiação solar criou-se duas atmosferas variando a concentração de NO_x entre 0,2 e 0,5 ppmv. Sob irradiação solar é notória a atividade fotocatalítica das argamassas, correspondendo maiores teores de TiO_2 a melhores desempenhos (Figura 5.36 e 5.37). A quantificação das constantes cinéticas de pseudo primeira ordem é indicada na Tabela 5.5.

Todas as amostras foram usadas num segundo ensaio de degradação, tendo-se verificando a repetibilidade do desempenho fotocatalítico. A taxas de degradação apresentadas foram similares entre ensaios indiciando a durabilidade e manutenção da eficácia do processo de mineralização de NO_x nas condições testadas. A Figura 5.38 sintetiza os valores da taxa de degradação total obtidos.

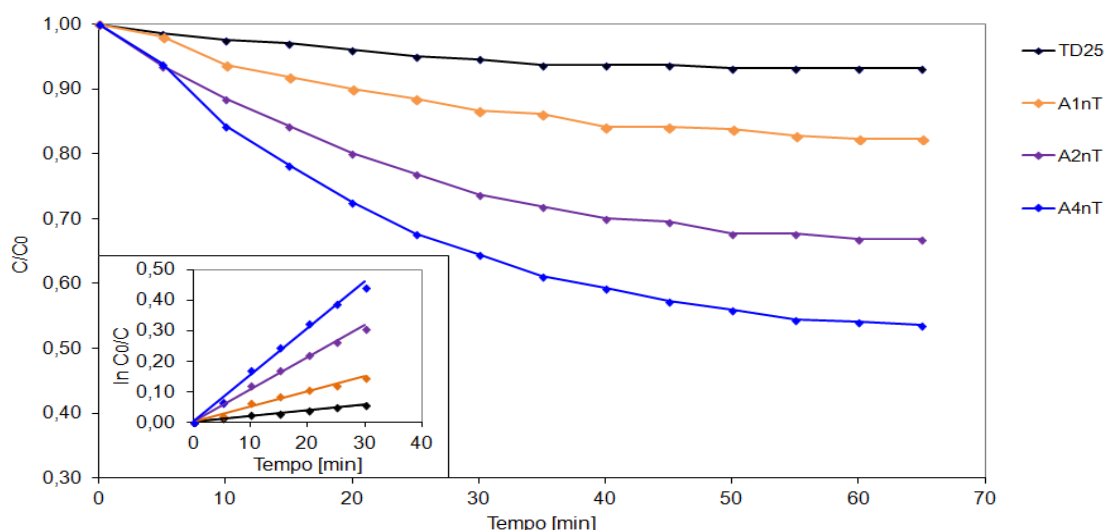


Figura 5.36: Diminuição da concentração de NO_x na atmosfera sob radiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,2 ppmv).

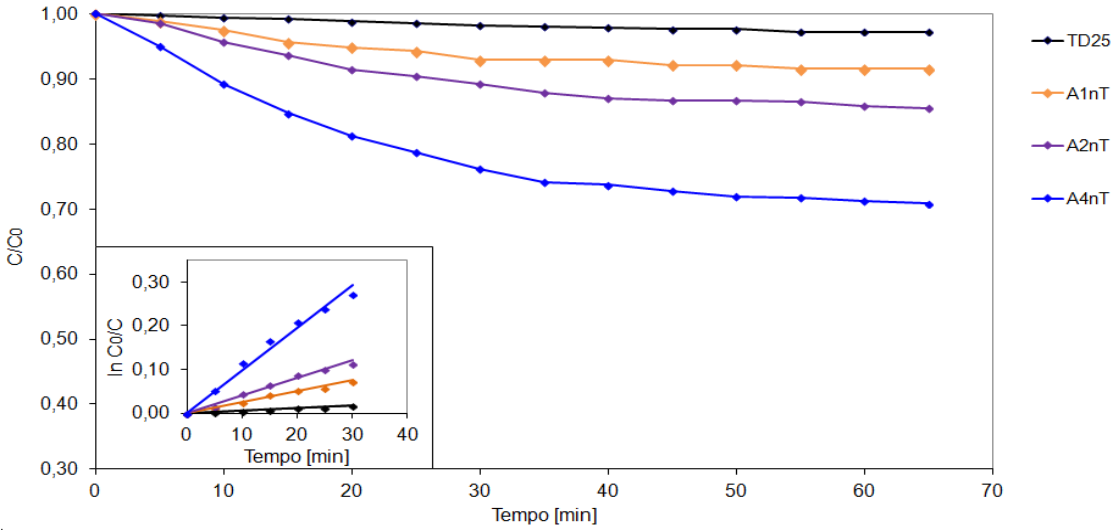


Figura 5.37: Diminuição da concentração de NO_x na atmosfera sob radiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,5 ppmv).

Tabela 5.5: Taxa de degradação de NO_x , avaliada pela constante cinética de pseudo primeira ordem e respectivos coeficientes de correlação.

	0,2 ppmv-R.Visível		0,2 ppmv-R. solar		0,5 ppmv-R. solar	
Amostra	$K_{30} \times 10^{-3}$ [min ⁻¹]	R ²	$K_{30} \times 10^{-3}$ [min ⁻¹]	R ²	$K_{30} \times 10^{-3}$ [min ⁻¹]	R ²
TD25	1,40	0,95	2,00	0,97	0,60	0,99
A1nT	0,57	0,94	5,11	0,97	2,52	0,98
A2nT	0,59	0,95	10,63	0,99	4,14	0,98
A4nT	0,62	0,86	15,52	0,99	9,73	0,98

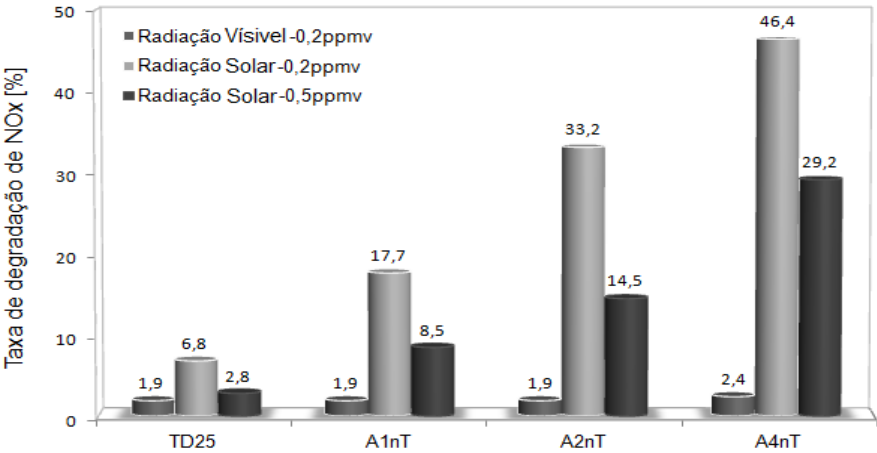


Figura 5.38: Taxa de degradação fotocatalítica total de NO_x .

As diferenças estruturais entre as argamassas poderiam afetar a exposição do TiO_2 à irradiação. Apesar da adição de TiO_2 à argamassa TD25 representar uma maior quantidade de agente fotocatalítico disponível, uma vez que este só atua na camada externa da argamassa, atingida pela radiação, procurou-se quantificar por EDS, o teor de TiO_2 na superfície das amostras (Tabela 5.6). O aumento do teor de adição de TiO_2 traduz-se efetivamente num aumento da quantidade de TiO_2 presente na superfície das amostras, ou seja, na quantidade de TiO_2 exposta ao poluente e à radiação.

Tabela 5.6: Massa de TiO_2 na superfície das amostras das diferentes argamassas contendo TiO_2 .

Amostra	C norm.[wt%]
TD25 *(Rutilo)	2,64
A1nT	3,24
A2nT	4,52
A4nT	8,93

A Figura 5.39 mostra a distribuição das partículas de TiO_2 na superfície das diferentes amostras. Maiores quantidades de TiO_2 resultam numa clara aglomeração dessas mesmas partículas, contudo o aumento do seu volume é mais expressivo.

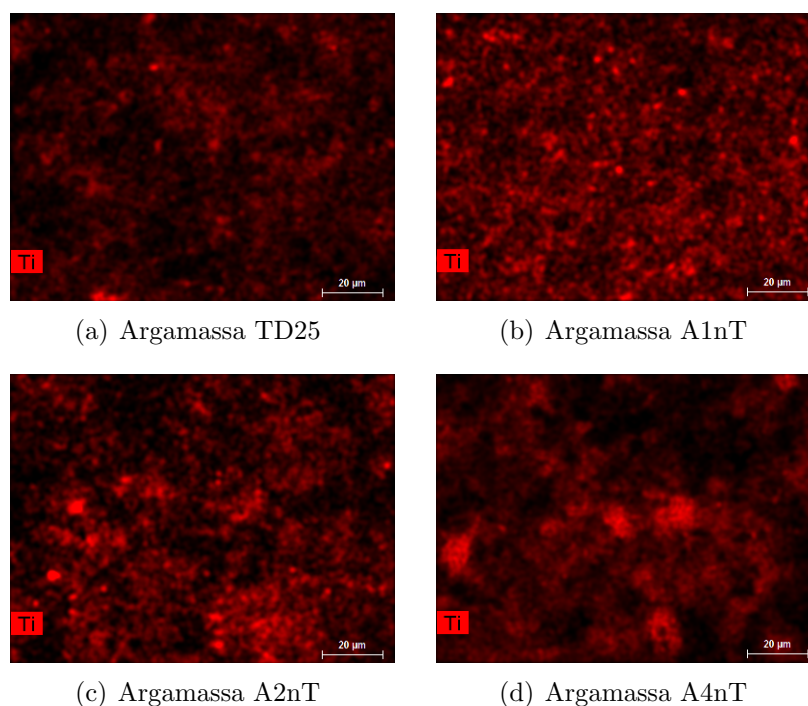


Figura 5.39: Mapeamento superficial das partículas de TiO_2 nas diferentes argamassas, obtido por SEM/EDS.

A eficiência fotocatalítica das argamassas contendo diferentes teores de TiO_2 foi também aferida pela descoloração de solução de RhB. Este ensaio, pela sua natureza empírica, apenas permite a comparação entre materiais. A Figura 5.40 apresenta a evolução da degradação de RhB com o incremento do teor de TiO_2 . A influência do conteúdo de TiO_2 é notória no caso da exposição das amostras a irradiação solar e ténue sob irradiação visível. Este comportamento é semelhante ao observado na degradação de NO_x (Figura 5.38).

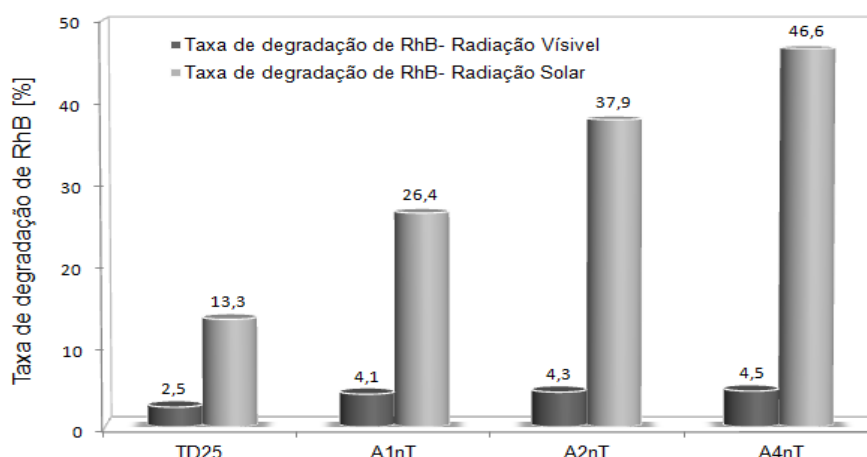


Figura 5.40: Degradação de Rodamina B.

O possível incremento do teor de TiO_2 , para além de acrescer os custos de produção, exige a reformulação cuidadosa da argamassa para evitar a expectável degradação mecânica. Em argamassas multifuncionais fixou-se o teor de adição de TiO_2 em 2% como solução de compromisso.

5.2.4 Argamassas para modelação higroscópica

Argamassas com agentes superabsorventes ou porogénicos

Na formulação de argamassas para controlo higroscópico a metodologia experimental foi ligeiramente alterada estudando-se primeiramente o impacto nas características mecânicas da adição de polímeros superabsorvente (*SAP*) e agentes porogénicos (V_{er} , Fb_{Cel} e C_{rt}). Com base na seleção das formulações que apresentaram características mecânicas aceitáveis estudou-se então o seu desempenho funcional. Esta alteração da metodologia prende-se com a morosidade do ensaio *MBV* e com o considerável número de aditivos testados. Desta forma, através da caracterização das propriedades das argamassas no estado endurecido efetuou-se uma triagem das formulações. A natureza física e química dos aditivos e o teor de adição usado influencia fortemente a consistência das argamassas.

Polímeros superabsorventes

Caracterização no estado endurecido

A introdução de *SAP* tende a decrescer abruptamente a plasticidade das argamassas. A natureza iónica do processo de retenção/libertação de água e a estrutura interconectada das partículas reduz a quantidade de água disponível no processo de amassadura, resultando na necessidade de diminuir o rácio sólidos/líquidos para que ocorra a completa hidratação do ligante e se garanta o espalhamento definido. O aumento do teor de água de amassadura vai, após a cura, deixar um volume superior de poros, resultando na fragilização mecânica da estrutura (Figura 5.41). Numa fase preliminar definiram-se três teores de adição (0,5 ; 1,0 ; 1,5%) sendo doravante as respetivas argamassas denominadas de A0,5SAP, A1SAP e A1,5SAP.

Autores como Gonçalves *et al.* [73] atribuem à morfologia das partículas de *SAP* um efeito benéfico da resistência à flexão. No referido trabalho esse efeito é visível para teores de adição apenas iguais ou superiores a 2%, não testados no presente trabalho.

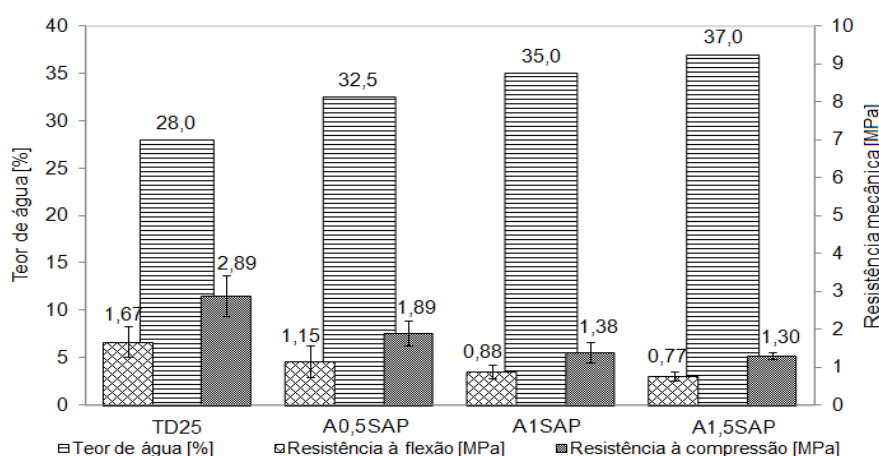


Figura 5.41: Evolução do teor de água de amassadura e das propriedades mecânicas com a adição de *SAP*.

Apesar da introdução de *SAP* exigir um aumento do teor de água, a porosidade aberta e, consequentemente os níveis de densidade aparente e de absorção de água das amostras permanecem quase inalteráveis (Figura 5.42 e 5.43). A existência de reações expansivas das partículas de *SAP* compensará, em parte, a criação adicional de poros, sendo tal facto já anteriormente descrito por outros autores [73]. A redução da resistência e da rigidez das argamassas é especialmente notória no módulo de elasticidade dinâmico, com a redução de quase 50% com a adição de 1,5% de *SAP* (Figura 5.42).

O aumento de massa das amostras contendo *SAP* entre o vigésimo primeiro e vigésimo oitavo dia de cura revelou-se estatisticamente irrelevante, sugerindo que ocorre a total saturação das partículas de *SAP* durante o processo de amassadura ou até ao vigésimo primeiro dia de cura.

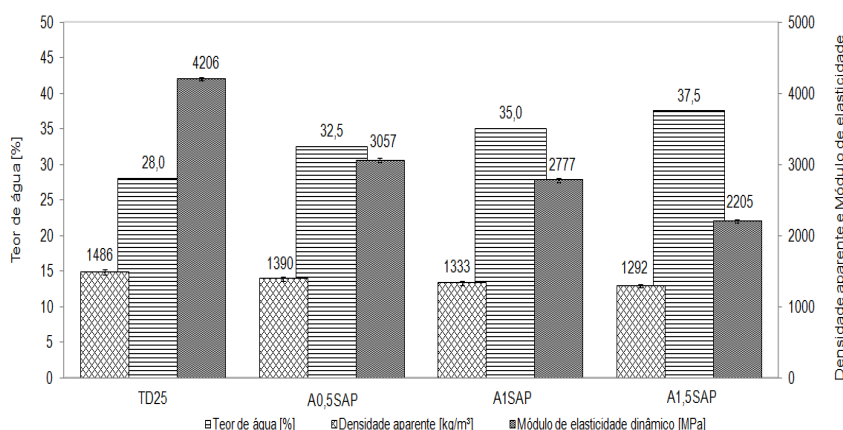


Figura 5.42: Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de *SAP*.

A porosidade aberta das amostras curadas aumenta com o teor de adição de *SAP* (Figura 5.43), embora as alterações sejam modestas. Crê-se que este efeito resulta do aumento volumétrico das partículas de *SAP* e da tendência para o preenchimento de parte dos poros existentes. A introdução de partículas de *SAP* tende a aumentar os valores de absorção de água e absorção de água por capilaridade (Figura 5.44). Esta última tendência sugere a criação de um maior número de poros de menores dimensões e maior conexão entre si. A análise morfológica da porosidade confirma a distribuição bimodal [64]. Este tipo de distribuição explica a diminuição das características mecânicas e o simultâneo aumento da capacidade de absorção de água por capilaridade.

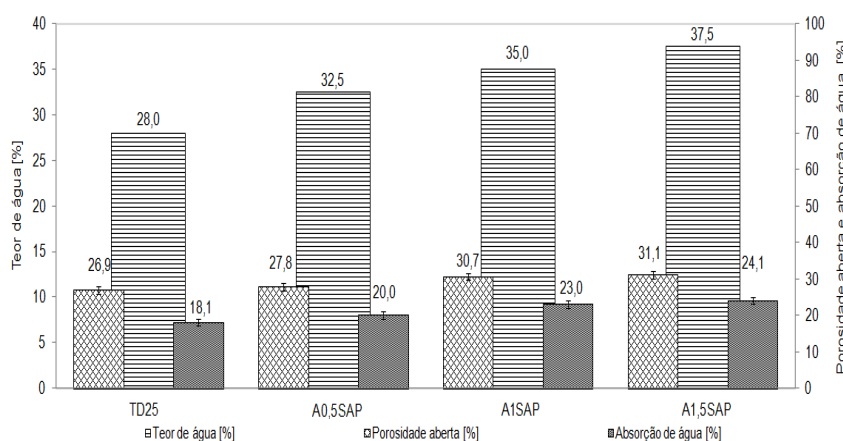


Figura 5.43: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição *SAP*.

A introdução de partículas de *SAP* aumenta consideravelmente a velocidade de absorção e a capacidade de máxima de absorção de água por capilaridade (Figura 5.44). A velocidade de absorção de água é constante e observa-se o prolongamento da fase de dessorção, estando os valores indicados na Tabela 5.7.

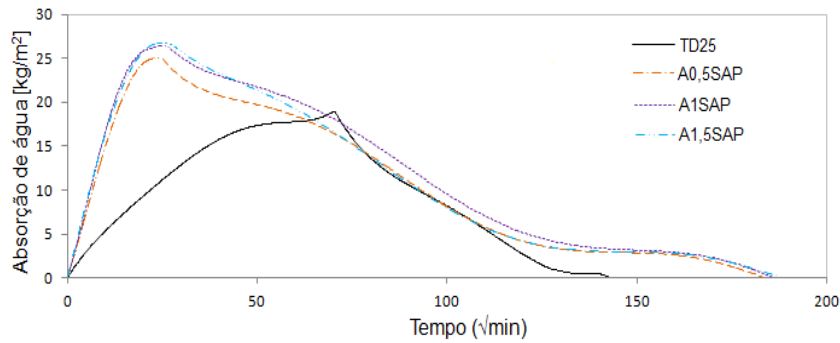


Figura 5.44: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade da argamassa TD25 e argamassas com *SAP*.

Tabela 5.7: Impacto da adição de *SAP* no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A0,5SAP	1,44	24,76	0,032
A1SAP	1,60	26,28	0,035
A1,5SAP	1,57	26,55	0,037

Comparando o comportamento das argamassas A1SAP e A1,5SAP, que apresentam velocidades de absorção, capacidade de retenção máxima e duração da fase de dessorção bastante similares é observável que o aumento da quantidade de *SAP* não altera significativamente o comportamento das argamassas face à água.

Caracterização funcional

Comportamento higroscópico

Gonçalves *et al.* [73] seguindo a metodologia *NordTest* classificaram como "Bom" o desempenho de argamassas contendo 1,0% *SAP*. Apesar do menor desempenho higroscópico de materiais como V_{er} , Fb_{Cel} e C_{rt} (quantificado por Cerolini *et al.* [88]) a perspectiva ecológica deste trabalho e a possibilidade de incorporação conjunta destes materiais com partículas de *SAP* juntamente com a acentuada diminuição das características mecânicas que a adição de 1,5% de *SAP* induz na argamassa TD25, levou à fixação do teor de *SAP* em 1%.

A argamassa A1SAP apresenta o valor de *MBV* prático de $1,96 (g/(m^2 \cdot \%HR) @8/16h)$. Comparativamente com a argamassa TD25 a introdução de 1% de *SAP* melhorou o desempenho higroscópico da argamassa, aumentando a capacidade de transferência de água em $0,69 g/(m^2 \cdot \%HR) @8/16h)$. Segundo a metodologia *NordTest* a argamassa A1SAP encontra-se no limiar de obter a classificação de "Excelente".

Apesar das linhas de tendência dos valores de massa máxima e mínima apresentarem declives ligeiramente diferentes (Figura 5.45), nota-se uma tendência de redução da quantidade de água quer adsorvida quer libertada, parecendo existir a estabilização da capacidade higroscópica da argamassa somente ao terceiro ciclo de variação de humidade relativa. Contrariamente à argamassa TD25 parece não existir tendência de diminuição cíclica da quantidade de água adsorvida e libertada após o segundo ciclo de absorção/libertação de água. Os valores da massa de água absorvida e libertada a cada ciclo são indicados na Tabela 5.8. A velocidade de absorção mostra-se superior à velocidade de dessorção (Figura 5.45).

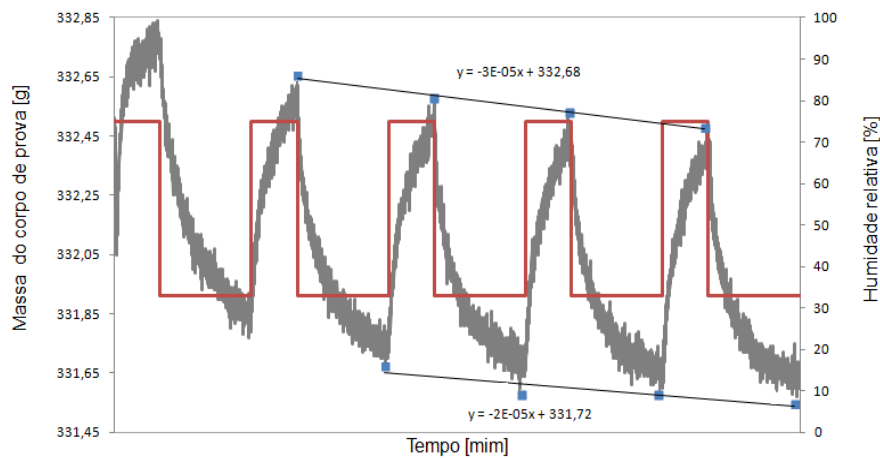


Figura 5.45: Variação da massa da argamassa A1SAP registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

Tabela 5.8: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de *MBV* da argamassa A1SAP.

Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ%HR]
1	0,90	0,95	1,96
2	0,89	0,94	
3	0,88	0,90	
4	0,88	0,90	

Vermiculite expandida

Caracterização do estado endurecido

A utilização de vermiculite expandida (V_{er}) como aditivo na formulação de argamassas com elevado desempenho higroscópico pretende diminuir a energia total incorporada das formulações contendo somente *SAP*. Apesar do tratamento térmico

utilizado durante a sua produção, a V_{er} apresenta-se como uma alternativa mais sustentável e economicamente viável. A eficiência higroscópica da V_{er} é consideravelmente inferior à das partículas de *SAP* [88]. Não menosprezando tal facto, aditivou-se a argamassa TD25 de quatro teores distintos de V_{er} (5,0; 7,5; 10,0 e 15,0%). Estas formulações serão designadas como A5V; A7,5V; A10V e A15V, respetivamente.

A retenção de parte considerável do teor de água de amassadura na estrutura reticulada da V_{er} durante o processo de amassadura é responsável pela diminuição da quantidade de água livre e consequente redução da trabalhabilidade e fluidez da mistura. Deste modo, a adição de V_{er} requer um teor de água de amassadura superior para que se assegure o espalhamento definido (Figura 5.46).

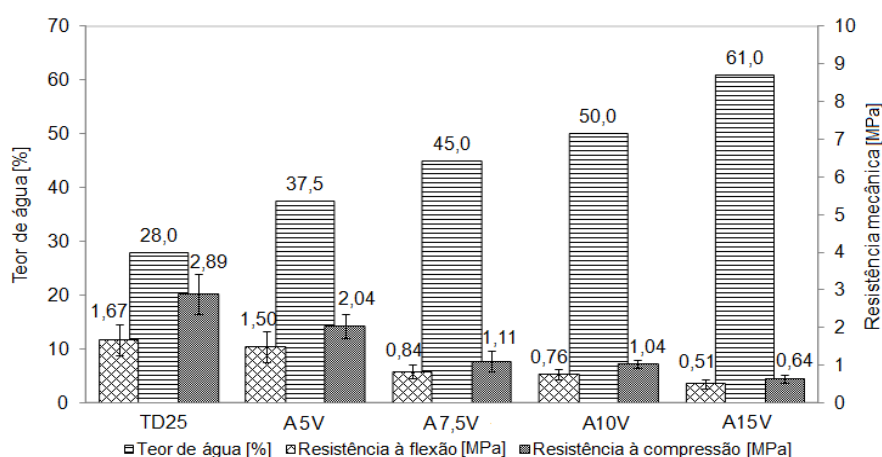


Figura 5.46: Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição V_{er} .

A necessidade de aumentar o teor de água de amassadura com a introdução de V_{er} revelou-se bastante superior ao registado com a adição de *SAP*. Com a dosagem mínima testada de V_{er} (5%), o teor de água de amassadura é superior ao requerido quando usada a máxima dosagem de *SAP* (1,5%). O aumento do teor água de amassadura origina menor desempenho mecânico, sendo proporcional à dosagem de V_{er} . De notar ainda a considerável redução das características mecânicas para teores de adição de V_{er} superiores a 5%.

A redução da densidade exibida pelas misturas contendo maiores dosagens de V_{er} está intrinsecamente associada à porosidade que esta introduz na estrutura do material curado (Figura 5.47). Os valores de densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico diminuem com o aumento do teor de adição de V_{er} (Figura 5.48).

A redução de resistência e rigidez da argamassa é proporcional ao teor de V_{er} , atingindo-se valores tão reduzidos que limitam o teor de V_{er} a 7,5%. O aumento de massa das amostras entre o vigésimo primeiro e vigésimo oitavo dia de cura (sendo máximo na argamassa A15V de 0,26%) revela que o processo de cura aos vinte e um dias já terá terminado e que a V_{er} retém água do meio envolvente, desempenhado

assim a sua função de modelação higroscópica. Apesar de apenas se tratar de um indicativo, este facto deixa antever um comportamento higroscópico aceitável.

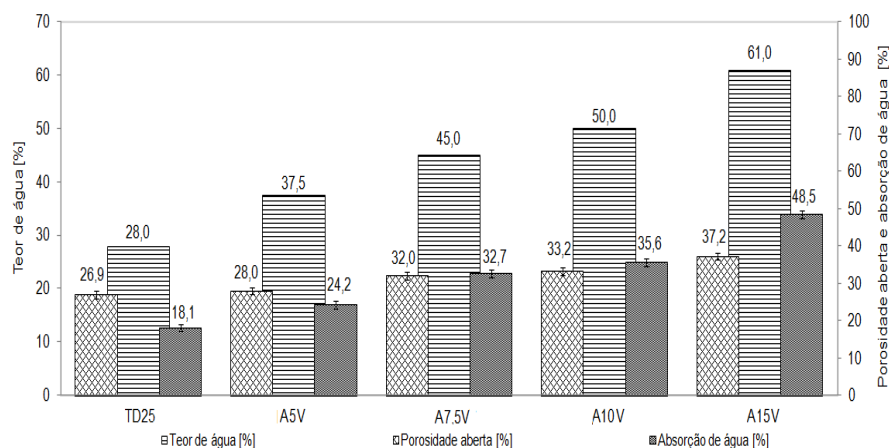


Figura 5.47: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição V_{er} .

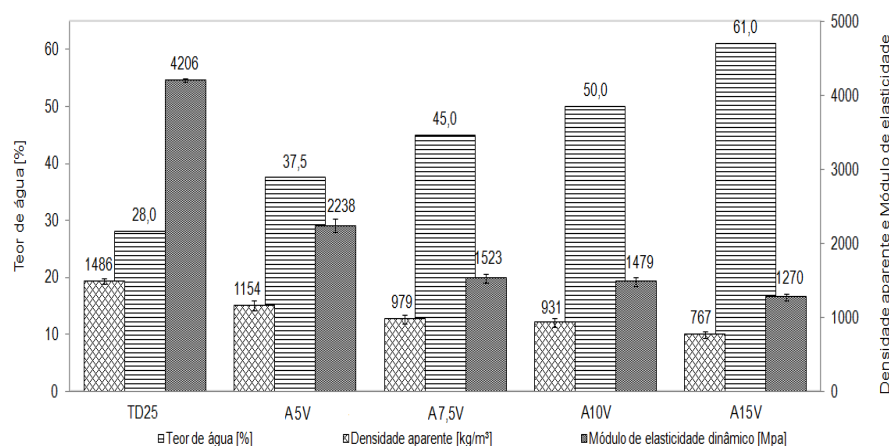


Figura 5.48: Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de V_{er} .

Na Figura 5.49 é possível observar o aumento da velocidade de absorção por capilaridade com o aumento do teor de V_{er} . A capacidade máxima de absorção de água é também superior quando se aumenta o teor de V_{er} . O aumento do volume de poros e a capacidade que a V_{er} apresenta em fixar água na sua estrutura contribuem decisivamente para este facto (Tabela 5.9). De notar ainda, a existência de uma segunda fase de absorção, de menor velocidade. Este facto sugere uma distribuição bimodal dos poros. As argamassas A5V e A7,5V apresentam um comportamento similar entre si e consideravelmente distinto das argamassas A10V e A15V, tanto na fase de absorção como na fase de dessorção. Tal comportamento indica que apesar

do ligeiro aumento da porosidade aberta existe uma alteração na distribuição e dimensão média dos poros para teores de adição de V_{er} superiores a 7,5%.

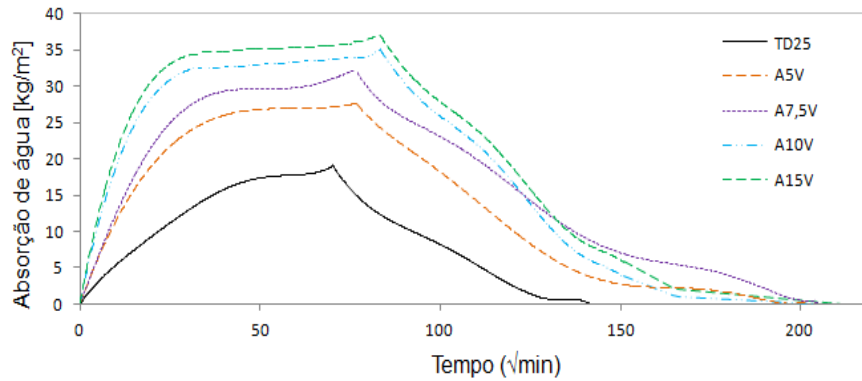


Figura 5.49: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade das argamassas contendo V_{er} .

Tabela 5.9: Impacto da adição de V_{er} no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A5V	0,84	22,54	0,047
A7,5V	1,38	32,64	0,052
A10V	1,46	33,69	0,053
A15V	2,04	36,86	0,058

Caracterização funcional

Comportamento higroscópico

A introdução de V_{er} não provoca melhoria do desempenho higroscópico da argamassa TD25, observando-se inclusivamente uma ligeira redução da capacidade de transferência de água com a envolvente (Figura 5.50). Os ensaios *MBV* das restantes formulações são indicados em apêndice. A adição de V_{er} causa a diminuição cíclica da quantidade de água libertada sem tendência para estabilizar após quatro ciclos decorridos. A geometria intrincada dos poros da V_{er} poderá influenciar negativamente o comportamento higroscópico das argamassas na fase de libertação de água. Em oposição, a quantidade de água absorvida não apresenta qualquer tendência clara. O prolongamento da fase de absorção poderia esclarecer este fenómeno (Tabela 5.10). Para teores de adição inferiores a 10% os valores de *MBV* são próximos do obtido com a argamassa TD25. Apesar deste facto, pelas

complexas interações entre os aditivos e pelas eventuais alterações morfológicas decorrentes da sua adição conjunta, decidiu-se testar a adição conjunta de *SAP* e *V_{er}* (5 e 7,5%).

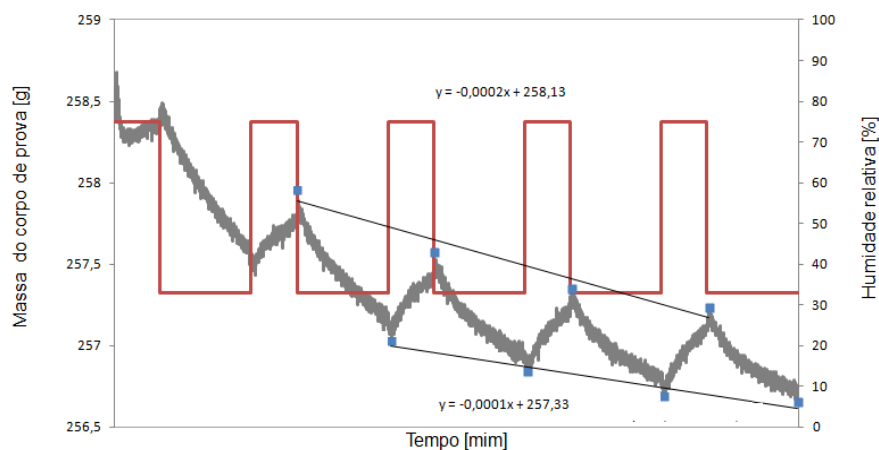


Figura 5.50: Variação da massa da argamassa A5V registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

Tabela 5.10: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de *MBV* das argamassas com *V_{er}*.

Amostra	Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ%HR]
A5V	1	0,46	0,82	1,24
	2	0,46	0,67	
	3	0,46	0,63	
	4	0,52	0,56	
A7,5V	1	0,45	0,47	1,06
	2	0,48	0,49	
	3	0,49	0,54	
	4	0,51	0,50	
A10V	1	0,50	0,57	1,26
	2	0,57	0,59	
	3	0,60	0,60	
	4	0,61	0,63	
A15V	1	0,47	0,46	0,96
	2	0,46	0,44	
	3	0,46	0,41	
	4	0,44	0,40	

Fibras de celulose

Caracterização do estado endurecido

Apesar do valor MBV de fibras de celulose (Fb_{Cel}) ser inferior ao de polímeros superabsorventes, o seu desempenho na modelação higroscópica é classificado como "Excelente" segundo a metodologia *NordTest* [88]. Testaram-se por isso três dosagens distintas de Fb_{Cel} (2,5; 5,0 e 7,5%). O teor de água retido pelas Fb_{Cel} foi estimado em 9,8% e considerado no processo de amassadura. Os teores de adição de Fb_{Cel} efetivos foram estimados em 2,2; 4,3 e 6,3%, sendo as formulações respetivamente designadas por A2,2F; A4,3F e A6,3F.

O incremento do teor de adição de Fb_{Cel} provoca o aumento do teor de água de amassadura, para assegurar o mesmo nível de espalhamento. Após cura, verifica-se o aumento do nível de porosidade aberta, que se traduz na degradação das propriedades mecânicas das argamassas (Figura 5.51).

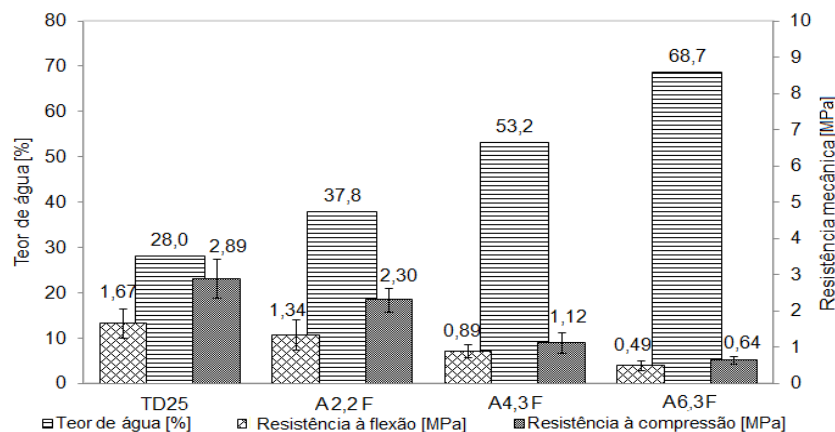


Figura 5.51: Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de Fb_{Cel} .

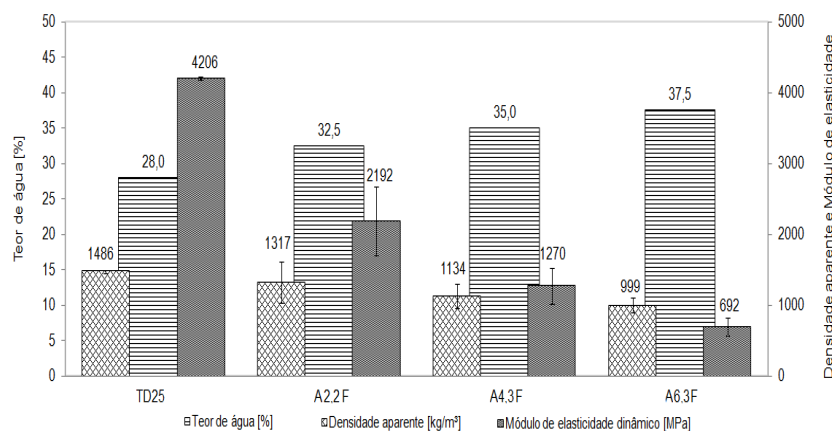


Figura 5.52: Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de Fb_{Cel} .

A densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas diminui com a adição de Fb_{Cel} , estando esse facto relacionado com a porosidade adicional existente (Figura 5.52). A porosidade aberta e capacidade de absorção de água sofrem um acentuado acréscimo com o aumento sucessivo da dosagem de Fb_{Cel} (Figura 5.53).

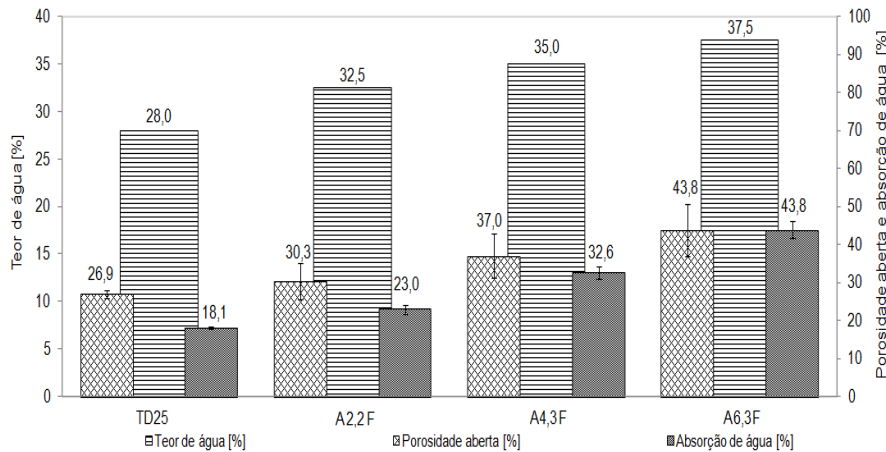


Figura 5.53: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição de Fb_{Cel} .

A diminuição da massa das amostras entre o vigésimo primeiro e o vigésimo oitavo dia de cura foi de aproximadamente 0,05%. A adição de Fb_{Cel} à argamassa TD25 altera significativamente a cinética do processo de absorção e dessorção de água, verificando-se um acentuado acréscimo da absorção de água na fase inicial (Figura 5.54). A aglutinação de Fb_{Cel} de diferentes tamanhos origina a existência de vazios de diversas dimensões. A existência destes vazios juntamente com a afinidade para com as moléculas de água aumenta a velocidade de absorção de água. Apesar de Cerolini *et al.* [88] classificar como superior o comportamento higroscópico das partículas de *SAP*, no referido trabalho testaram-se fibras isoladamente e não argamassas. As argamassas com Fb_{Cel} apresentam coeficientes de absorção de água por capilaridade e valores assintóticos superiores aos registados com a adição de *SAP* e V_{er} . A absorção ocorre em dois estágios bastante distintos e a fase de dessorção é prolongada consideravelmente (Tabela 5.11).

Tabela 5.11: Impacto no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade da introdução de Fb_{Cel} .

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
A2,2F	1,06	28,38	0,083
A4,3F	2,79	32,46	0,052
A6,3F	2,94	37,56	0,061

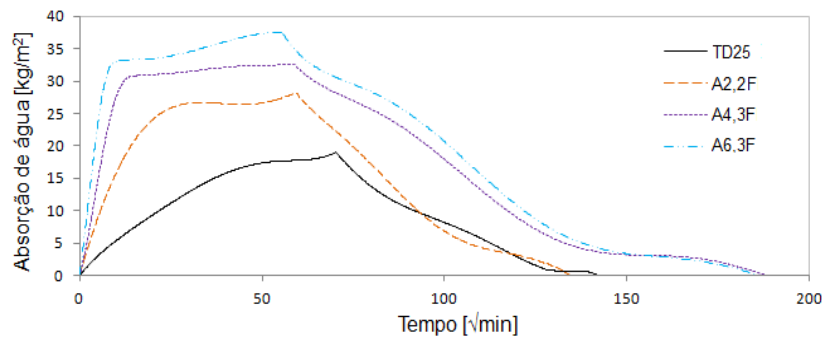


Figura 5.54: Curva de absorção e dessorção de água de argamassas contendo Fb_{Cel} .

Caracterização funcional

Comportamento higroscópico

As argamassas com Fb_{Cel} apresentam valores de MBV superiores à argamassa padrão. A argamassa A4,3F apresenta um valor de MBV bastante superior à argamassa TD25, aproximando-se inclusive da argamassa A1SAP (Tabela 5.12). O comportamento higroscópico das argamassas A2,2F e A4,3F é estável (Figura 5.55 e 5.56). No entanto, a adição teores superiores a 4,3% causam acentuada deterioração das características mecânicas (Figura 5.52), sendo este o teor limite na formulação de argamassas onde se conjugou Fb_{Cel} e SAP e na formulação de argamassas multifuncionais. Por esta razão o ensaio MBV da argamassa A6,3F não foi realizado.

Tabela 5.12: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de MBV das argamassas com Fb_{Cel} .

Amostra	Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ %HR]
A2,2F	1	0,65	0,68	1,43
	2	0,67	0,68	
	2	0,67	0,68	
	4	0,67	0,65	
A4,3F	1	0,78	0,81	1,77
	2	0,79	0,82	
	3	0,83	0,84	
	4	0,82	0,86	

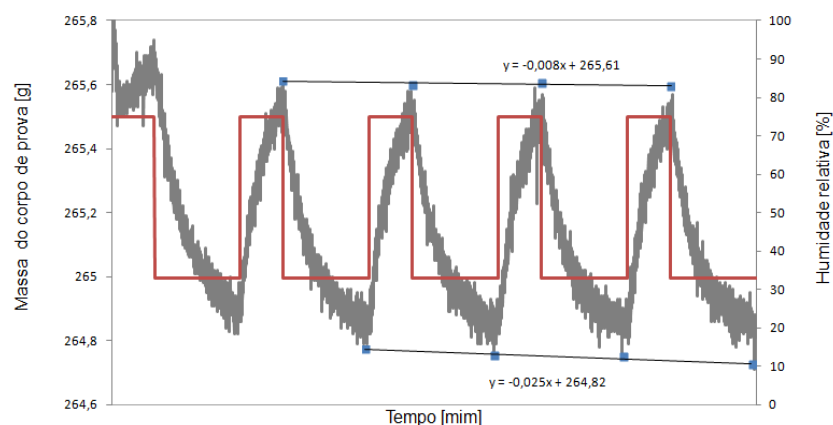


Figura 5.55: Variação da massa da argamassa A2,2F registada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

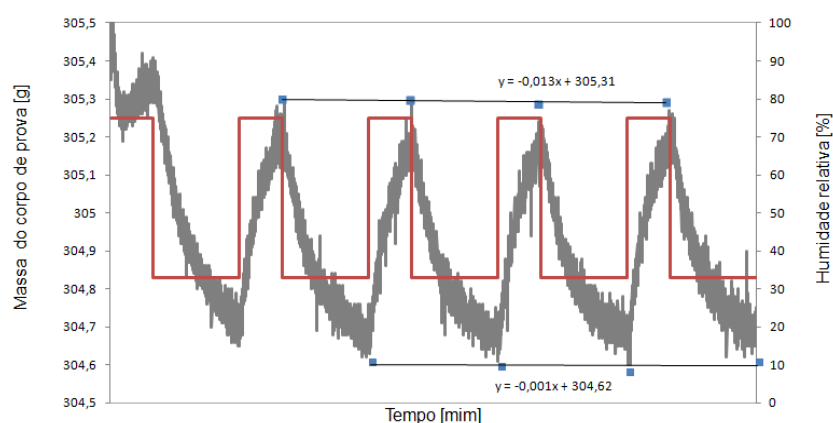


Figura 5.56: Variação da massa da argamassa A4,3F registada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

Por se tratar de um bioderivado e tentando antever a possível ocorrência de degradação das fibras, sujeitaram-se as argamassas A2,2F, A4,3F e A6,3F a sucessivos e prolongados períodos de submersão parcial em água e posterior secagem. Como é possível constatar na Figura 5.57 as argamassas contendo Fb_{Cel} apresentam sinais de degradação quando expostas ciclicamente a condições severas.



Figura 5.57: Argamassa A6,3F após sucessivos ciclos de submersão e secagem.

Aglomerados de cortiça

Caracterização do estado endurecido

O valor MBV dos agregados de cortiça (C_{rt}) utilizados no presente trabalho não se encontra descrito na literatura, porém a sua estrutura alveolar leva a crer que a sua adição na formulação de argamassas poderá melhorar o comportamento higroscópico destas. A adição de agregados de cortiça possibilitará a criação de uma estrutura com elevada porosidade. Além disso, a seleção deste aditivo reforça o uso de agentes de natureza ecológica. A C_{rt} foi incorporada tal como recebida.

O teor de humidade foi estimado de 1,78% foi considerado na formulação das mistura, resultando em teores efetivos de 2,4, 4,7 e 6,9% de cortiça. Doravante as formulações resultantes da adição de C_{rt} à argamassa TD25 serão denominadas de A2,4C; A4,7C e A6,9C consoante o teor de C_{rt} .

O uso de C_{rt} requer o aumento do teor de água de amassadura, deteriorando as propriedades mecânicas (Figura 5.58). Para teores de adição similares aos de Fb_{Cel} , a cortiça origina uma redução considerável da resistência à compressão, enquanto que a resistência à flexão se mantém próxima da obtida com Fb_{Cel} .

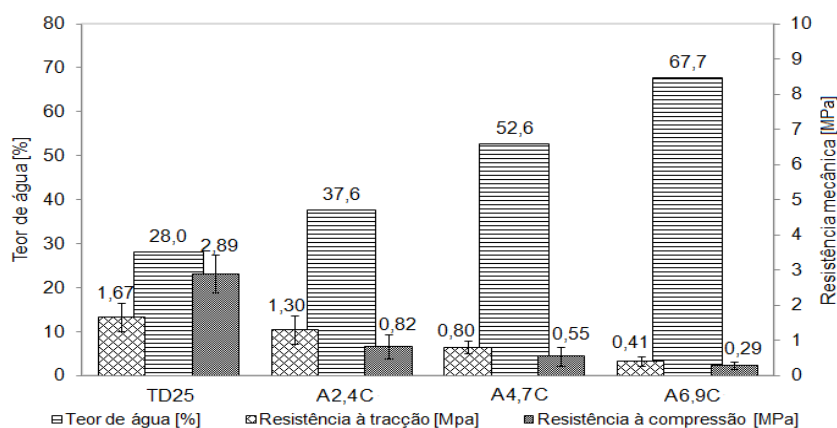


Figura 5.58: Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas com a adição de C_{rt} .

A incorporação de C_{rt} diminui a densidade aparente e o módulo de elasticidade do material para valores semelhantes aos registados formulações contendo V_{er} (Figura 5.59). Relativamente às Fb_{Cel} , as amostras não possuem valores superiores de porosidade aberta e de absorção de água, o que sugere a formação de uma rede porosa menos interconectada (Figura 5.60).

A velocidade de absorção de água no período inicial é menor comparativamente à das argamassas contendo Fb_{Cel} mas ainda assim superior à registada com SAP e V_{er} . A capacidade máxima de absorção é inferior à das argamassas contendo Fb_{Cel} . Ainda que os teores de adição de SAP e V_{er} não sejam equiparáveis aos de Fb_{Cel} e C_{rt} , a capacidade de absorção de água da argamassa A4,7C é bastante superior ao da argamassa A5V e a todas as argamassas contendo SAP (Tabela 5.13).

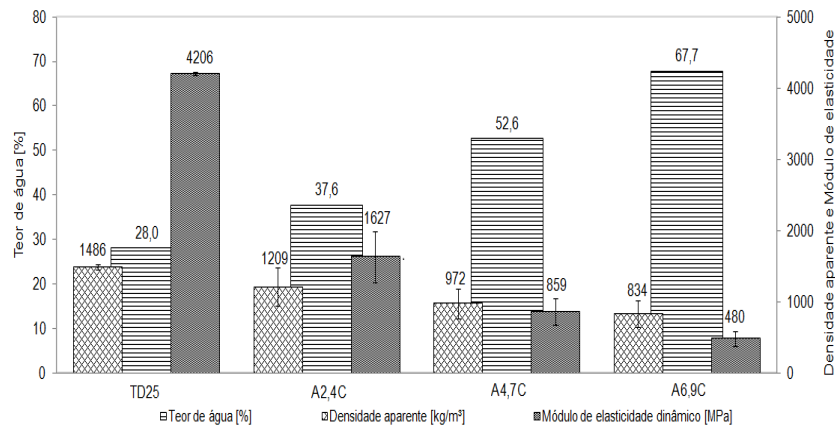


Figura 5.59: Evolução do teor de água de amassadura, módulo de elasticidade e densidade aparente com a adição de C_{rt} .

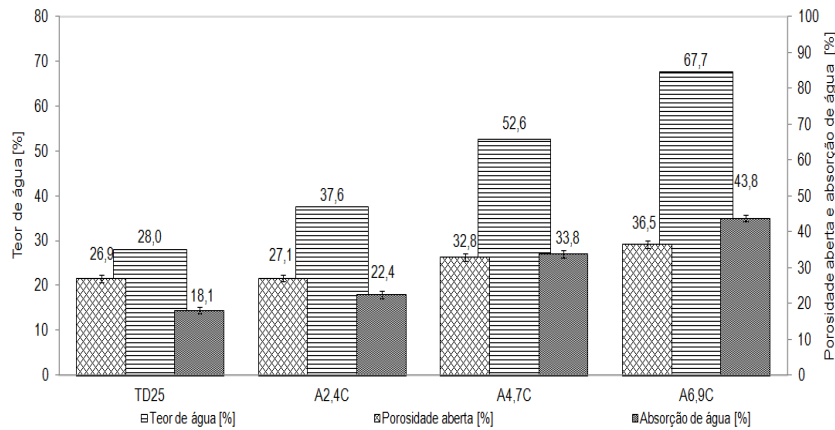


Figura 5.60: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água com a adição de C_{rt} .

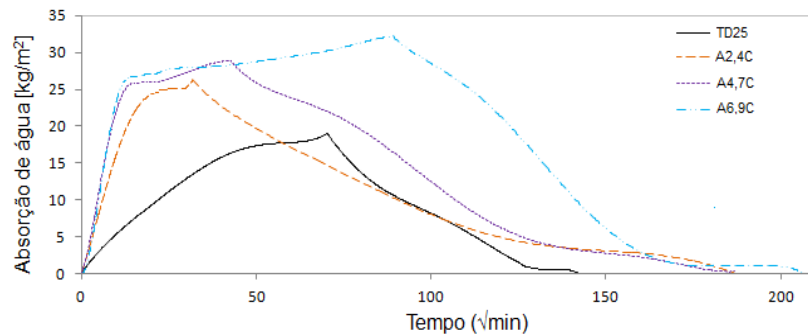


Figura 5.61: Curva de absorção e dessorção de água de argamassas contendo C_{rt} .

Registe-se ainda a diminuição da duração da segunda fase de absorção face ao sucedido com a adição de Fb_{Cel} .

Mais uma vez, aditivos com forte afinidade com moléculas de água resultam

no prolongamento da fase de secagem (Tabela 5.13). A capacidade de retenção de água apresentada pelos aditivos destinados à melhoria do comportamento higroscópico acelera o processo de absorção e o valor máximo de água retido na estrutura das argamassas, sendo então necessário maior tempo para completar sua a secagem.

Tabela 5.13: Impacto no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade da introdução de C_{rt} .

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A2,4C	0,80	26,16	0,026
A4,7C	2,30	28,85	0,049
A6,9C	2,81	32,08	0,035

As argamassas contendo C_{rt} registaram um aumento da massa entre o vigésimo primeiro e vigésimo oitavo dia de cura. O aumento da massa observado foi proporcional ao teor de C_{rt} , sendo máximo na argamassa A6,9C (0,14%). O aumento da massa é revelador da absorção de água da atmosfera envolvente, ou seja, da capacidade modeladora a nível higroscópico das argamassas contendo C_{rt} .

Caracterização funcional

Comportamento higroscópico

Atendendo aos resultados mecânicos apenas se determinou o valor de MBV para as argamassas A2,4C e A4,7C. As Figuras 5.62 e 5.62 mostram a evolução da massa das amostras quando expostas a variações cíclicas de humidade e temperatura.

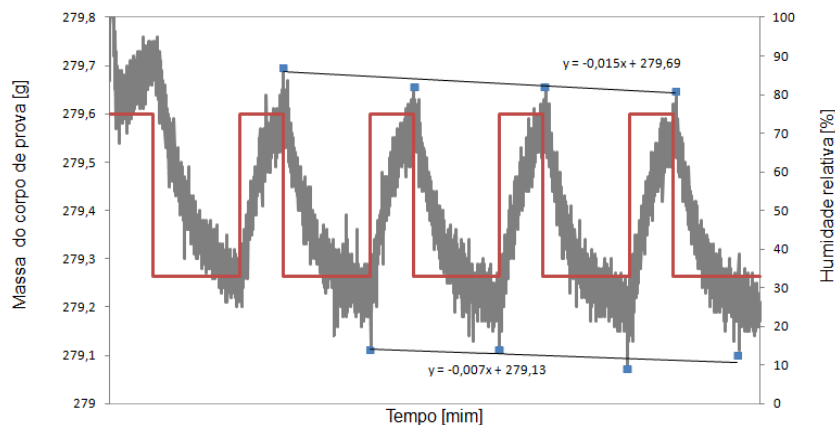


Figura 5.62: Variação da massa da argamassa A2,4C registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

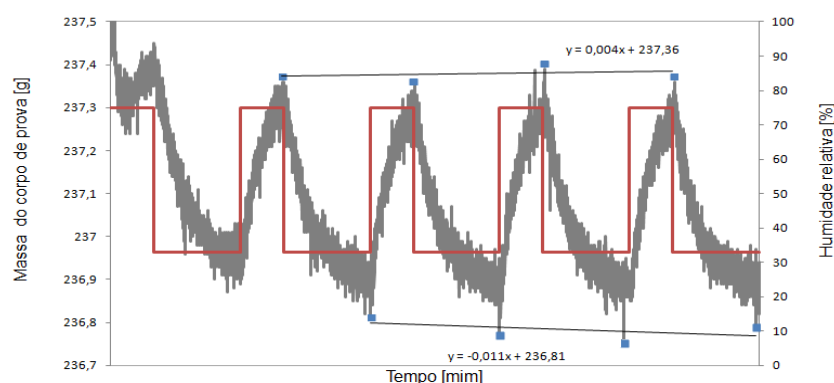


Figura 5.63: Variação da massa da argamassa A4,7C registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

Denota-se a tendência para o ligeiro aumento da massa de água libertada após cada ciclo, mantendo-se aproximadamente constante a massa de água absorvida. Este facto significa que a absorção de água durante o período de exposição a 75% de HR não compensa totalmente a remoção de água durante a exposição a 33% de HR (Tabela 5.14). A C_{rt} não é portanto um agente absorvente, tratando-se apenas de um formador de poros no material.

Tabela 5.14: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de *MBV* das argamassas com C_{rt} .

Amostra	Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ %HR]
A2,4C	1	0,48	0,56	1,14
	2	0,52	0,52	
	3	0,52	0,56	
	4	0,55	0,52	
A4,7C	1	0,49	0,54	1,24
	2	0,53	0,58	
	3	0,62	0,64	
	4	0,61	0,61	

Sendo a C_{rt} um material orgânico também os provetes das argamassas A2,4C, A4,7C e A6,9C foram submetidos a sucessivos e prolongados períodos de submersão parcial em água e posterior secagem. Na Figura 5.64 é possível constatar a ocorrência de deterioração e desagregação do material.



Figura 5.64: Argamassa A6,9C após sucessivos ciclos de submersão e secagem.

Considerando a formulação de argamassas biaditivas destinados à melhoria do valor de MBV da argamassa TD25 não se desprezou, apesar dos resultados de MBV obtidos, a possibilidade da C_{rt} potenciar uma maior expansão da rede das partículas de SAP e, dessa forma, melhorar o comportamento higroscópico da argamassa. Em formulações contendo SAP e C_{rt} limitou-se o teor de adição de C_{rt} a 4,7% procurando obter resistências mecânicas compatíveis com o mínimo desejável em argamassas.

Argamassas biaditivadas para modelação higroscópica

Caracterização do estado endurecido

Apesar da seleção de aditivos no presente trabalho ter em consideração o seu caráter ecológico, o elevado desempenho higroscópico dos polímeros superabsorventes levou à fixação do teor de 1% de SAP no desenvolvimento de argamassas biaditivadas para controlo higroscópico e de argamassas multifuncionais. A adição de 1% de SAP à argamassa TD25 permite obter uma argamassa classificada de "Bom" segundo a metodologia *NordTest*.

A análise das características das argamassas contendo apenas um aditivo, definiu os teores de adição de V_{er} , Fb_{Cel} e C_{rt} a conjugar com 1% de SAP . Foi então testada a adição conjunta de 1% de SAP com (i) 7,5 e 10% de V_{er} (A1SAP7,5V e A1SAP10V); (ii) 2,2 e 4,3% de Fb_{Cel} (A1SAP2,2F e A1SAP4,3F) e (iii) 2,4 e 4,7% de C_{rt} (A1SAP2,4C e A1SAP4,7C).

Na Figura 5.65 é possível constatar a necessidade de aumento do teor de água de amassadura resultante da adição conjunta de aditivos porogénicos e SAP , relativamente às formulações contendo apenas cada um daqueles aditivos. Isto é especialmente notório nas argamassas A1SAP2,2F e A1SAP4,3F.

Como consequência, a resistência à compressão tende a diminuir relativamente à formulação contendo apenas SAP . Este decréscimo acentua-se com o aumento do teor de agentes porogénicos. No entanto, a resistência à flexão evolui de forma contrária, existindo o acréscimo relativamente à argamassa A1SAP, excetuando a formulação A1SAP4,7C. Este comportamento indica alguma capacidade de acomodação das tensões axiais de tração. A natureza elástica das Fb_{Cel} e C_{rt} e os vazios existentes na sua estrutura (incluindo a estrutura reticulada da V_{er}) permitirão a libertação de tensões, retardando a rutura. As argamassas A1SAP2,2F e

A1SAP4,3F apresentam melhorias significativas da resistência à flexão como consequência da influência positiva das Fb_{Cel} .

Registe-se ainda a semelhança de valores entre as argamassas A1SAP2,2F e A1SAP4,3F, sugerindo não ser necessário aumentar os teores de Fb_{Cel} . Analisando de uma perspectiva inversa, são ainda visíveis diferentes interações entre o SAP e os restantes aditivos porogéneos. A adição de SAP aumenta a resistência à flexão das argamassas A7,5V e A10V enquanto que diminui a resistência das argamassas A2,2F, A4,3F, A2,4C e A4,7C. A nível da resistência à compressão existe um efeito negativo generalizado da introdução de SAP (Figura 5.65).

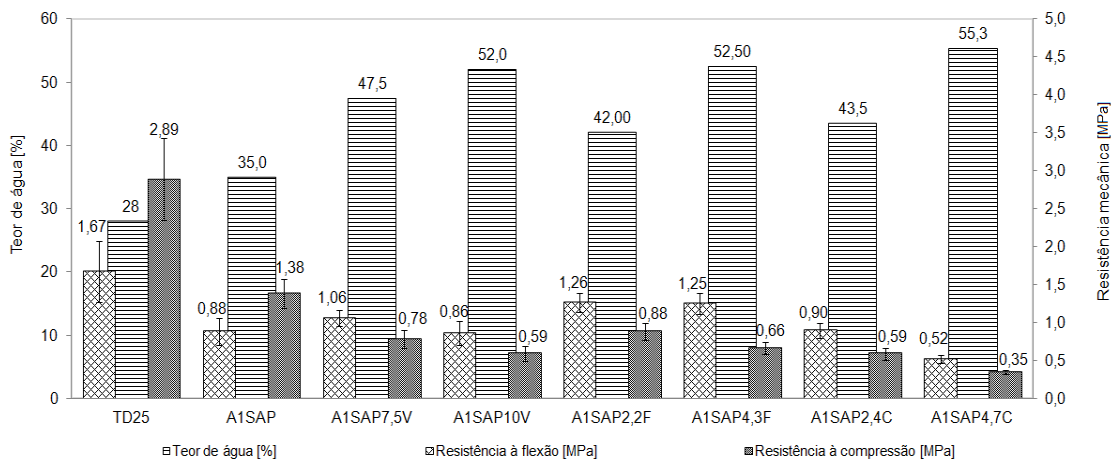


Figura 5.65: Teor de água de amassadura e propriedades mecânicas de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.

A adição conjunta de 1% de SAP e 7,5 ou 10% de V_{er} aumenta a porosidade aberta e a absorção de água das argamassas relativamente às argamassas A1SAP, A7,5V e A10V. Verifica-se ainda a redução da densidade aparente e do módulo de elasticidade dinâmico. Nas argamassas contendo Fb_{Cel} e C_{rt} a adição de 1% de SAP provoca alterações semelhantes mas de amplitude distinta. Nas argamassas contendo Fb_{Cel} e 1% de SAP a redução do módulo de elasticidade é sobretudo notória na argamassa A2,2F. Com misturas contendo SAP e C_{rt} esta redução não é tão acentuada, verificando-se porém um aumento significativo da porosidade aberta e da absorção de água (Figura 5.66 e 5.67).

A formulação de argamassas contendo aditivos multiformes e multidimensionais resulta em diferentes microestruturas. A distinta granulometria e geometria dos aditivos porogénicos adicionados conjuntamente com SAP conferem diferentes níveis de compactação as argamassas. Aditivos fibrosos conferem uma maior abertura à estrutura, permitindo assim acomodar a expansão das partículas de SAP . A limitação da expansão das partículas de SAP reduz a porosidade aberta e a absorção de água das argamassas que contêm SAP e V_{er} . A superior densidade aparente e módulo de elasticidade destas argamassas também reflete tal facto.

Comparativamente com a argamassa A1SAP as argamassas biaditivadas apresentam densidade aparente e absorção de água bastante menor. A limitação da

absorção de água das partículas de *SAP* provocada pela V_{er} é suplantada pela baixa densidade que esta apresenta, sendo a densidade aparente e o módulo de elasticidade reduzidos. A porosidade aberta e a absorção de água nas argamassas A1SAP7,5V e A1SAP10V é menor que na argamassa A1SAP por não se conseguir a total saturação das partículas de *SAP* (Figura 5.66 e 5.67).

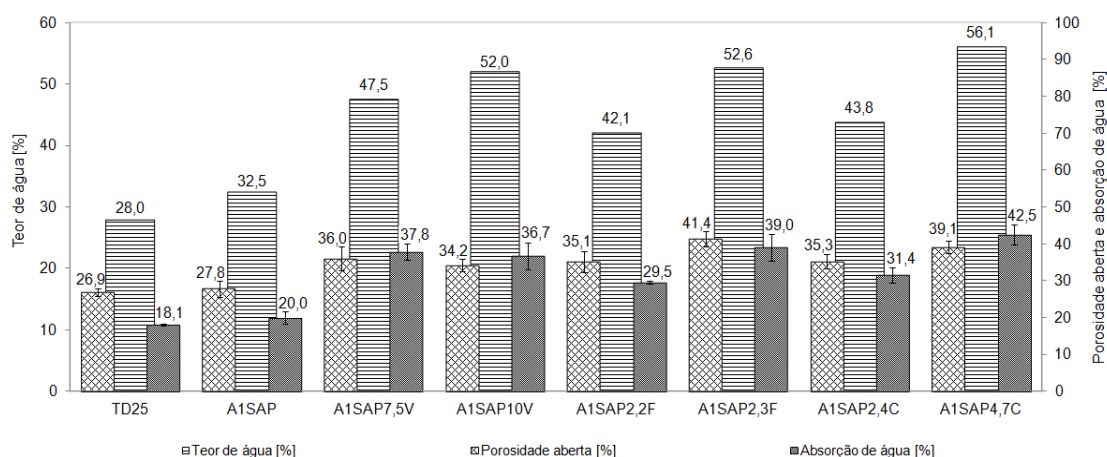


Figura 5.66: Teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.

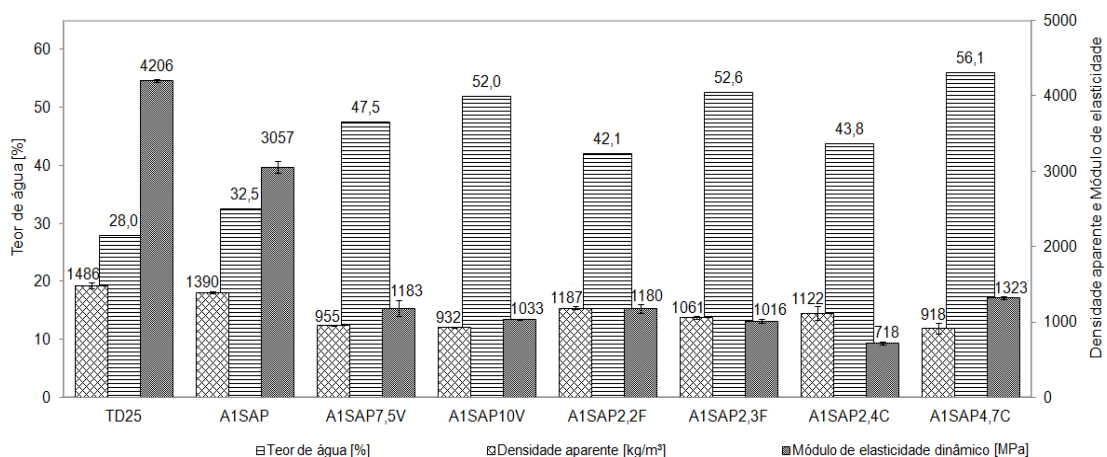


Figura 5.67: Módulo de elasticidade e densidade aparente de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.

A combinação de aditivos superabsorventes e porogénicos promove a rápida absorção de grandes quantidades de água, aumentando o coeficiente de absorção capilar e o valor assintótico. Com exceção das argamassas A1SAP7,5V e A1SAP10V onde o uso de uma maior quantidade de V_{er} origina a redução da quantidade máxima de água absorvida, todas as formulações biaditivadas apresentam maior capacidade de absorção de água com o aumento do teor de agente porogénico adicionado.

A evolução temporal da absorção de água por capilaridade (Figura 5.68) denota a existência de uma primeira fase, de elevada taxa, seguida de um prolongado e lento segundo estágio. Esta segunda fase corresponde à saturação dos poros de grandes dimensões. A adição de V_{er} e Fb_{Cel} juntamente com SAP reduz o índice de secagem de todas as formulações testadas, devendo-se tal facto ao aumento do tempo necessário para completar o processo. Por outro lado, a adição conjunta de C_{rt} e SAP aumenta o índice de secagem. A Tabela 5.15 quantifica o impacto no processo de absorção de água por capilaridade da introdução de múltiplos aditivos para modelação higroscópica.

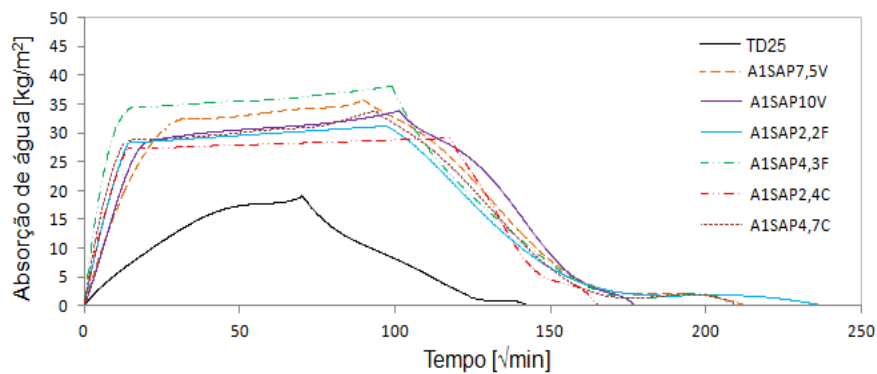


Figura 5.68: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade de argamassas biaditivadas para modelação higroscópica.

Tabela 5.15: Impacto no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade da introdução de múltiplos aditivos para modelação higroscópica.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A1SAP	1,60	26,28	0,035
A1SAP7,5V	1,57	35,60	0,097
A1SAP10V	2,33	33,79	0,096
A1SAP2,2F	2,09	31,20	0,031
A1SAP4,3F	3,15	38,06	0,034
A1SAP2,4C	2,27	31,22	0,136
A1SAP4,7C	2,49	33,68	0,036

Caracterização funcional

Comportamento higroscópico

As argamassas biaditivadas para controlo higroscópico possuem estruturas bastante porosas. O aumento da porosidade e a presença de maior quantidade aditivos com elevada afinidade hídrica pode não originar a melhoria do comportamento higroscópico. As complexas interações entre os aditivos não permite estabelecer uma relação direta entre a sua percentagem de incorporação e a melhoria efetiva do valor de MBV . A adição conjunta de SAP e V_{er} revelou ser prejudicial ao desempenho higroscópico das argamassas, sendo o valor de MBV bastante inferior ao da argamassa A1SAP (Tabela 5.16). A Figura 5.69 mostra a variação de massa da argamassa A1SAP7,5V durante o ensaio de MBV .

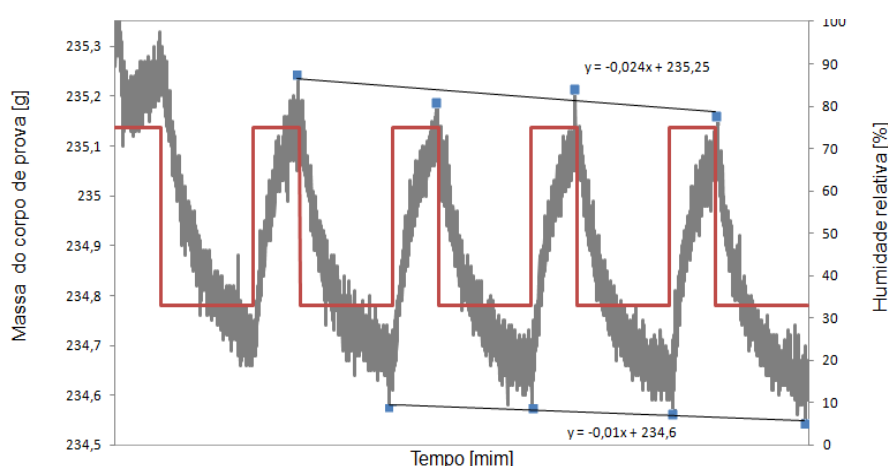


Figura 5.69: Variação da massa da argamassa A1SAP7,5V registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

A adição de Fb_{Cel} ou C_{rt} juntamente com SAP permite a obtenção de valores MBV bastante superiores (Tabela 5.16). Nestas argamassas o comportamento higroscópico individual de cada aditivo é potenciado. As argamassas contendo SAP e Fb_{Cel} são classificadas de "Excelente" segundo a metodologia *NordTest*. A adição C_{rt} apesar de abrir a estrutura das argamassas não beneficiou a sua capacidade higroscópica, tal como se previa pelo desempenho da C_{rt} isoladamente. A variação da massa destas formulações durante o ensaio MBV encontra-se exposta em apêndice.

As linhas de tendência dos valores de massa máxima e mínima apresentam declives semelhantes, denotando-se apenas uma ligeira tendência de redução da quantidade de água libertada. A capacidade higroscópica das argamassas parece ser estável. Somente as argamassas A1SAP4,3F e A1SAP4,7C exibem uma contínua diminuição da quantidade de água libertada ao fim de quatro ciclos de variação de humidade relativa. A não secagem prévia das amostras e a grande quantidade de aditivos com elevada afinidade com a água pode originar a presença de alguma

água no interior da estrutura, traduzindo-se numa redução do valor de MBV nos ciclos iniciais (Tabela 5.16).

Em conclusão, a mistura de 1% de SAP com 2,2 ou 4,3% Fb_{Cel} origina argamassas com ótimo desempenho higroscópico. Desta forma, as Fb_{Cel} são o único aditivo competente para aumentar a capacidade da argamassa com 1% de SAP e assim atingir a classificação de "Excelente" segundo a metodologia *NordTest*. Dado o desempenho funcional razoável das argamassas A1SAP2,4C e A1SAP4,7C, na formulação de argamassas multifuncionais salvaguardar-se-à uma vez a possibilidade da interações entre os aditivos potenciar o seu desempenho individual.

Tabela 5.16: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de MBV das argamassas biaditivadas para controlo higroscópico.

Amostra	Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² $\Delta\%$ HR]
A1SAP7,5V	1	0,57	0,65	1,30
	2	0,59	0,59	
	3	0,62	0,63	
	4	0,57	0,59	
A1SAP10V	1	0,48	0,54	1,14
	2	0,51	0,54	
	3	0,53	0,54	
	4	0,54	0,54	
A1SAP2,2F	1	0,98	0,96	2,08
	2	0,94	0,91	
	3	0,85	0,92	
	4	0,93	0,96	
A1SAP4,3F	1	1,08	1,09	2,30
	2	1,09	1,09	
	3	1,09	1,08	
	4	1,08	1,07	
A1SAP2,4C	1	0,80	0,86	1,78
	2	0,79	0,85	
	3	0,81	0,82	
	4	0,82	0,83	
A1SAP4,7C	1	0,80	0,84	1,70
	2	0,79	0,79	
	3	0,76	0,78	
	4	0,76	0,76	

5.2.5 Argamassas multifuncionais

Numa primeira fase formularam-se argamassas com capacidade de modelação higroscópica e melhoria da qualidade do ar interior por ação fotocatalítica. Com base nos resultados do ensaio *MBV* apresentados em 5.2.4 testou-se a incorporação de 2% de TiO_2 nas argamassas A1SAP2,2F, A1SAP4,3F, A1SAP2,4C e A1SAP4,7C. As argamassas resultantes serão designadas de A2nT1SAP2,2F, A2nT1SAP4,3F, A2nT1SAP2,4C e A2nT1SAP4,7C.

Numa segunda fase foi preparada uma composição contendo quatro aditivos distintos, pretendendo-se conjugar as três funções propostas. Esta formulação resulta da adição de 20% *PCM* e 2% de TiO_2 à mistura A1SAP4,3F. Esta mistura é designada com A2nT1SAP4,3F20P.

Caracterização no estado endurecido

A adição de TiO_2 provoca o aumento generalizado do teor de água de amassadura, tal como se tinha observado como o uso exclusivo deste aditivo. Este aumento origina a formação de estruturas com maior porosidade aberta e consequentemente, maior capacidade de absorção de água (Figura 5.70). Na generalidade o efeito sobre as propriedades físicas e mecânicas é semelhante ao já discutido aquando da aditivização das argamassas exclusivamente com TiO_2 (Figura 5.70 e 5.71).

O processo de absorção e secagem das amostras também é afetado pela adição de partículas de TiO_2 (Figura 5.72). Os valores do coeficiente de absorção capilar, valor assintótico e índice de secagem estão indicados na Tabela 5.17. Em geral, a adição de TiO_2 aumenta a velocidade de absorção inicial e a quantidade máxima de água absorvida por capilaridade, ainda que de forma pouco expressiva. A fase de secagem das argamassas contendo Fb_{Cel} parece não ser condicionada pela adição de TiO_2 sendo o seu efeito pouco notório. Já nas argamassas contendo C_{rt} e *SAP*, o índice de secagem aumenta.

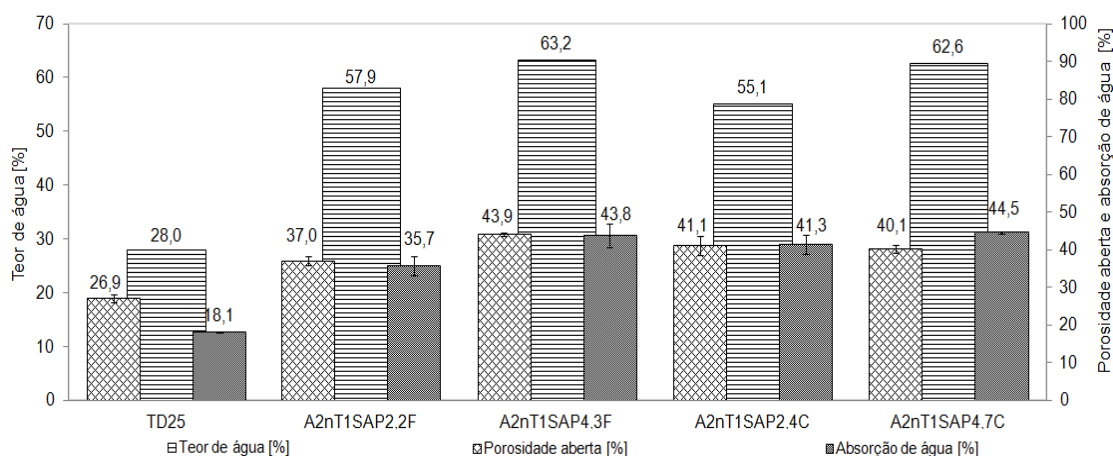


Figura 5.70: Evolução do teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água de argamassa multifuncionais.

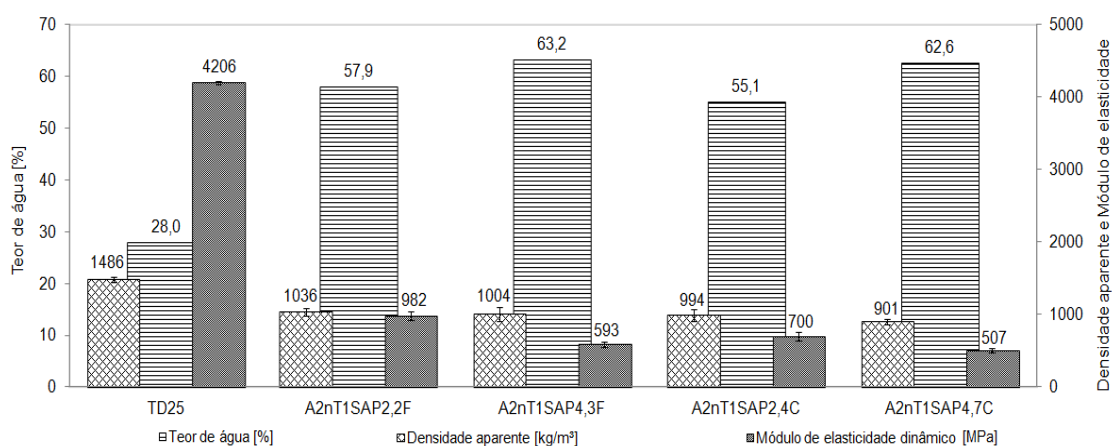


Figura 5.71: Evolução do teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade de argamassa multifuncionais.

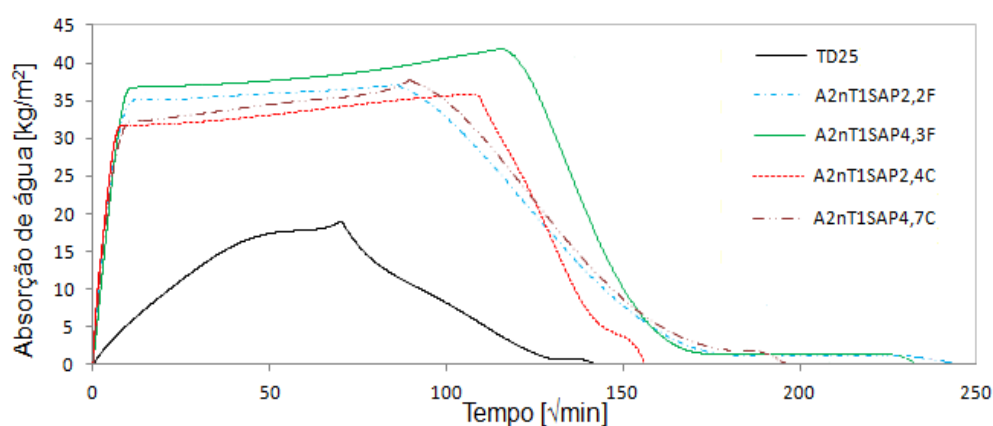


Figura 5.72: Curva de absorção e dessorção de água por capilaridade de argamassas multifuncionais.

Tabela 5.17: Impacto da adição de múltiplos aditivos no processo de absorção e dessorção de água por capilaridade.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \cdot \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2 \cdot h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A2nT1SAP2,2F	2,92	37,08	0,032
A2nT1SAP4,3F	3,41	41,43	0,037
A2nT1SAP2,4C	2,11	37,02	0,175
A2nT1SAP4,7C	2,40	37,80	0,051

A adição de TiO_2 exerce efeitos dispares nas propriedades mecânicas nas argamassas testadas (Figura 5.73). Os valores de resistência à flexão tendem a diminuir, sendo de aproximadamente metade nas formulações A1SAP2,2F e A1SAP4,3F e um terço na formulação A1SAP2,4C. Na formulação A1SAP4,7C esta redução é menor (-25%). As variações na resistência à compressão são menos expressivas.

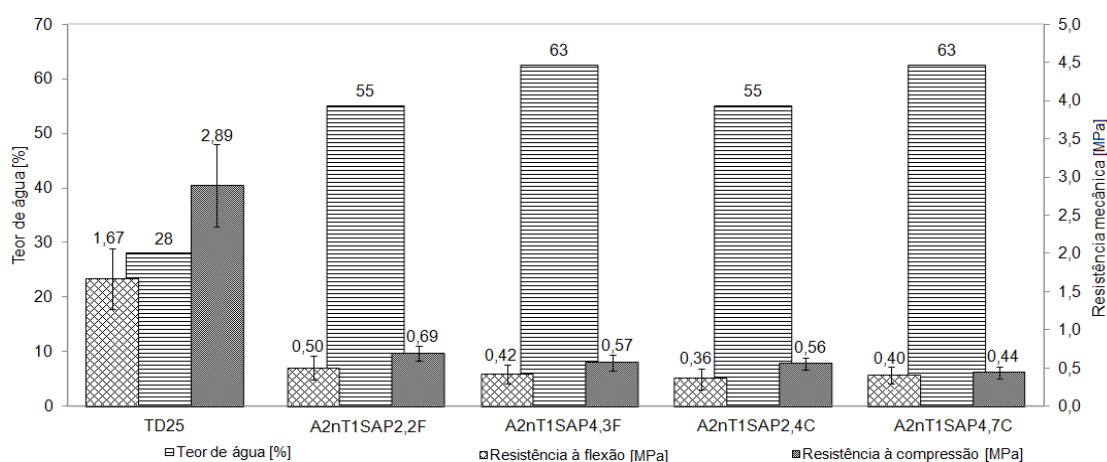


Figura 5.73: Evolução do teor de água de amassadura e propriedades mecânicas de argamassas multifuncionais.

Caracterização funcional

Comportamento higroscópico

A Tabela 5.18 mostra a massa de água absorvida e libertada durante cada ciclo de exposição a variações de humidade relativa impostas segundo a metodologia *NordTest*. Verifica-se uma tendência contínua para o ligeiro aumento da massa das amostras após cada ciclo de variação de humidade relativa sendo a massa de água absorvida continuamente superior à libertada. Este comportamento reflete a tendência para a saturação das amostras, sendo necessário prolongar a fase de secagem ou reduzir o teor de humidade relativa no meio envolvente. Este comportamento higroscópico resulta da adição de TiO_2 uma vez que argamassas similares já anteriormente referidas não apresentaram tal tendência.

A adição de TiO_2 incrementa ligeiramente o nível de porosidade aberta o que, por si só, não é garante de melhor comportamento higroscópico. Este desempenho parece ser sobretudo controlado pela distribuição do tamanho dos poros existentes na estrutura das argamassas, pela afinidade dos seus constituintes para com moléculas de água e pela interação entre aditivos. Partículas de TiO_2 de baixa granulometria tendem a contribuir para a redução do tamanho médio dos poros. A adição de TiO_2 contribui para o aumento do valor de *MBV* (Tabela 5.18), com a exceção da argamassa A2nT1SAP2,2F que apresenta um valor de *MBV* ligeiramente inferior à argamassa A1SAP2,2F. Esta tendência poderá estar relacionada

com a criação de estruturas porosas mais finas. A argamassa A1SAP foi a argamassa que, contendo apenas um aditivo, que apresentou melhor comportamento higroscópico. A adição de TiO_2 pode ainda contribuir para a melhoria deste desempenho, não pela formação adicional de poros, mas pela redução do tamanho dos poros existentes cuja origem não seja a expansão das partículas de *SAP* durante o processo de amassadura.

As argamassas A2nT1SAP2,2F, A2nT1SAP4,3F e A2nT1SAP2,4C apresentaram elevada capacidade higroscópica, obtendo a classificação de "Excelente" segundo a metodologia *NordTest* (Tabela 5.18).

Tabela 5.18: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de *MBV* das argamassas bifuncionais.

Amostra	Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ %HR]
A2nT1SAP2,2F	1	0,97	0,91	1,99
	2	0,94	0,88	
	3	0,93	0,91	
	4	0,93	0,89	
A2nT1SAP4,3F	1	1,08	1,09	2,35
	2	1,09	1,09	
	3	1,09	1,08	
	4	1,08	1,07	
A2nT1SAP2,4C	1	0,89	0,98	2,00
	2	0,91	0,95	
	3	0,95	0,91	
	4	0,92	0,87	
A2nT1SAP4,7C	1	0,83	0,88	1,78
	2	0,86	0,83	
	3	0,82	0,82	
	4	0,82	0,72	

Como o melhor comportamento higroscópico foi verificado com a argamassa A2nT1SAP4,3F, esta foi selecionada para incorporação de *PCM*, procurando estender a multifuncionalidade para a vertente de modelação térmica. A mistura resultante da incorporação de *PCM* é designada de A2nT1SAP4,3F20P. A formulação A2nT1SAP4,3F20P requer um teor de água de amassadura bastante elevado (62,5%). O teor de água de amassadura foi ajustado de forma a manter o espalhamento constante. Em futuros desenvolvimento de composições, o valor de SP poderá ser retificando, caso se pretenda diminuir o teor de água de amassadura para obter melhores características mecânicas.

Caracterização no estado em fresco da argamassa contendo três tipos de aditivos

Os tempos de presa inicial e final da argamassa A2nT1SAP4,3F20P foram estimados em 44 horas e 87 horas, respetivamente. Estes valores são muito superiores (quase duplos) aos estimados na argamassa TD25. Para melhor compreender o efeito da introdução de múltiplos aditivos no comportamento em fresco da argamassa TD25 realizaram-se ensaios de reologia nas argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P. A Figura 5.74 mostra a evolução do torque em função do tempo nas duas formulações testadas.

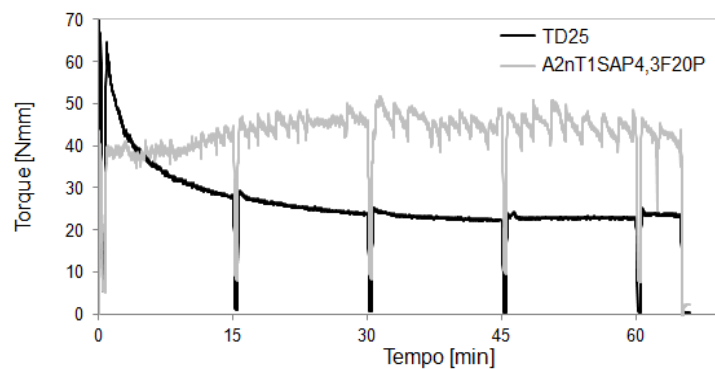


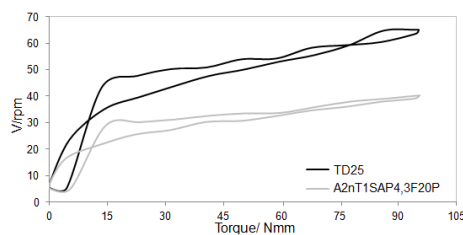
Figura 5.74: Evolução do torque em função do tempo para as argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

Através da análise da Figura 5.74 conclui-se que o torque é claramente influenciado pela distribuição granulométrica dos componentes das argamassas. A argamassa TD25 trata-se de um produto comercial com distribuição granulométrica bem definida, tendendo o valor de torque a estabilizar rapidamente. Numa fase inicial, a tensão de corte gerada pelo movimento de rotação promove a segregação dos aglomerados de cal existentes na argamassa, aumentando a sua área específica. A quantidade de água absorvida devido à existência de forças intermoleculares (forças de Van der Waals) torna-se então superior, diminuindo a quantidade de água livre capaz de lubrificar o amassado [95]. Após esta primeira fase, não se verifica o espessamento da argamassa, o que indica ter-se atingido um estado de fluidez estável. Na argamassa A2nT1SAP4,3F20P, o valor do torque tende a ser superior para tempos mais longos e com maiores flutuações. A tendência que as partículas de *SAP* e *Fb_{Cel}* demonstram para absorver moléculas de água diminui o volume de água livre na mistura, tornando-a menos fluída.

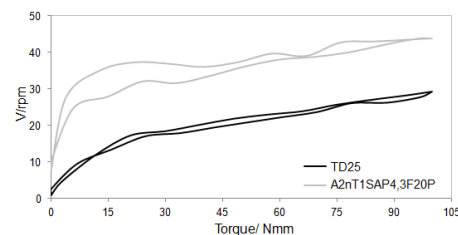
Assumindo um comportamento *Binghamiano* estimaram-se os parâmetros h e g , proporcionais à viscosidade plástica e à tensão de escoamento do amassado, respetivamente (Tabela 5.19). Após colocada em movimento, a argamassa padrão apresenta valores inferiores (e menos oscilantes) de viscosidade e tensão de escoamento, por comparação com a argamassa A2nT1SAP4,3F20P.

Tabela 5.19: Evolução da viscosidade plástica e tensão de escoamento ao longo do tempo das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

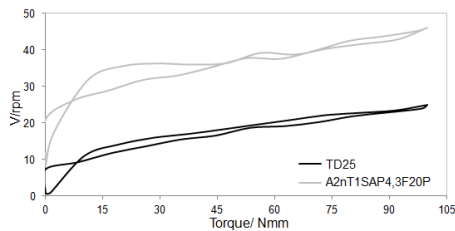
Amostra	Tempo [min]	Viscosidade plástica [Nmm/min]	Tensão de esc. [Nmm]	R ²
TD25	0	0,370	31,182	0,989
	15	0,184	10,753	0,966
	30	0,157	9,166	0,984
	45	0,142	9,064	0,982
	60	0,154	8,472	0,977
A2nT1SAP4,3F20P	0	0,202	20,779	0,981
	15	0,191	25,541	0,975
	30	0,204	25,756	0,989
	45	0,173	31,104	0,978
	60	0,176	28,825	0,975



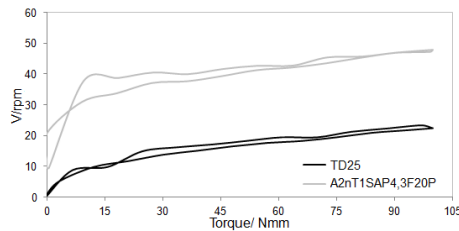
(a) t=0 min



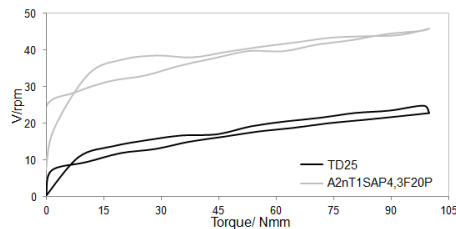
(b) t=15 min



(c) t=30 min



(d) t=45 min



(e) t=60 min

Figura 5.75: Evolução temporal da relação entre velocidade de rotação e torque nas argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

A área resultante da diferença entre as curvas de fluxo na fase de aceleração e desaceleração é proporcional à energia necessária para destruir a estrutura do material, ou seja, à energia necessária para restituir a fluidez inicial (comportamento tixotrópico). A análise da Figura 5.76 é reveladora da menor quantidade energia requerida pela a argamassa TD25.

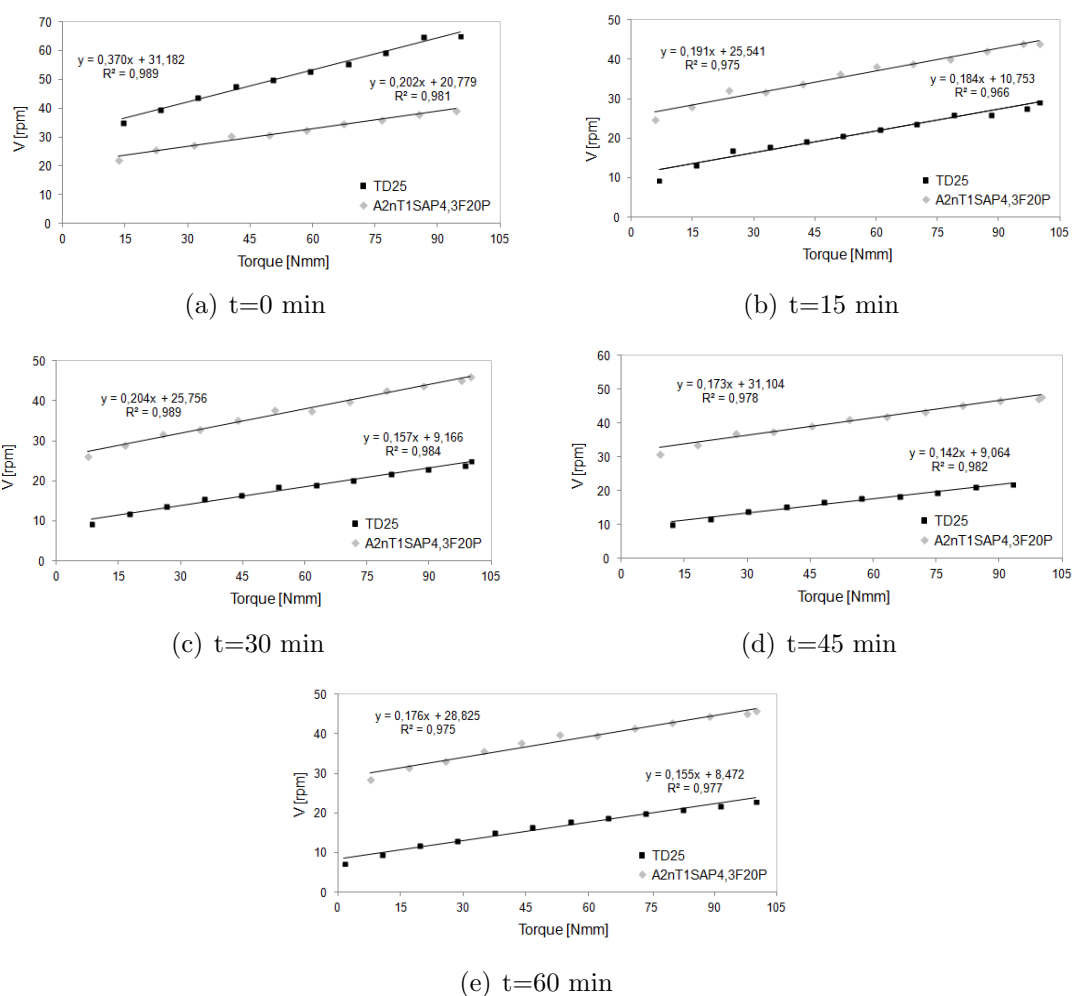


Figura 5.76: Relação entre velocidade de rotação e força de torque nas fases de redução da aceleração dos ensaios reológicos das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

Caracterização no estado endurecido da argamassa contendo três tipos de aditivos

A Figura 5.77 mostra o impacto da incorporação dos aditivos no teor de água de amassadura e na alteração da estrutura porosa da argamassa (aumento acentuado da porosidade aberta e absorção de água).

A porosidade das argamassas influencia diretamente a capacidade de absorção de água por capilaridade, como revela a Figura 5.78.

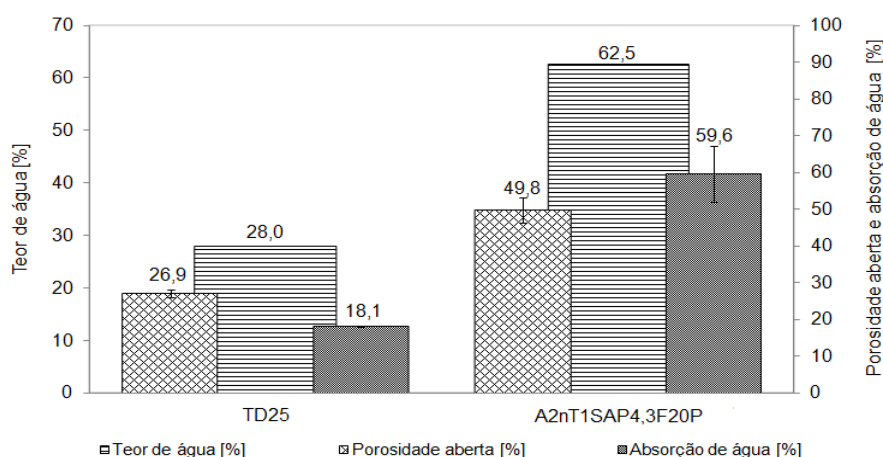


Figura 5.77: Teor de água de amassadura, porosidade aberta e absorção de água das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

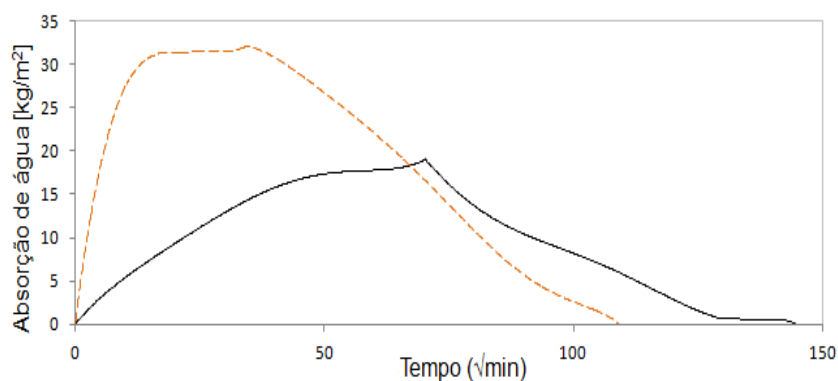


Figura 5.78: Curva de absorção e dessorção água por capilaridade das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

Para além do aumento da quantidade de água total absorvida, aumentaram também as taxas de absorção e dessorção (Tabela 5.20). A duração da segunda fase de absorção é menor na argamassa TD25, o que é coerente com a existência de menor número de poros de maior dimensão.

Tabela 5.20: Processo de absorção e dessorção de água por capilaridade de argamassa multifuncionais.

Amostra	C_c [$(Kg/m^2) \times \sqrt{min}$]	$V_{assimp.}$ [Kg/m^2]	I_s [$(Kg/(m^2.h))$]
TD25	0,44	18,93	0,055
A2nT1SAP4,3F	3,41	41,43	0,037
A2nT1SAP4,3F20P	2,80	32,08	0,181

A argamassa A2nT1SAP4,3F20P apresenta uma porosidade aberta próxima dos 50%, coerente com o valor de densidade aparente muito reduzido e bastante inferior ao limite que classifica as argamassas como leves (1300 Kg/m^3).

Naturalmente, a rigidez do material diminui como revela o menor valor do módulo de elasticidade dinâmico (Figura 5.79).

Em sintonia com estes valores, a argamassa A2nT1SAP4,3F20P apresenta valores reduzidos de resistência à flexão e à compressão (Figura 5.80).

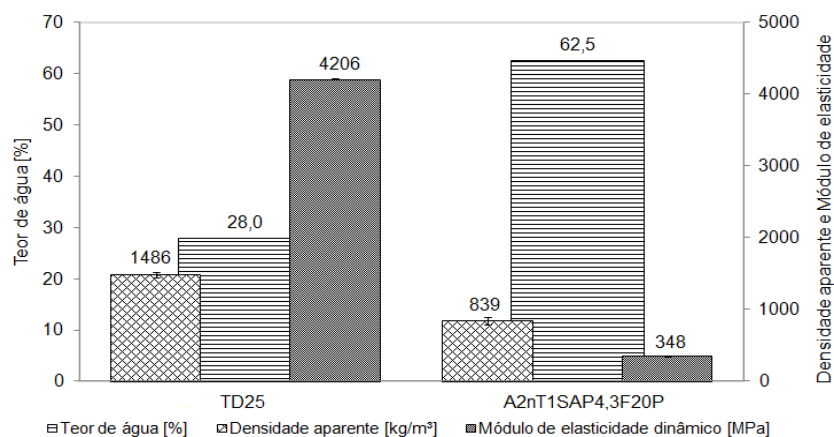


Figura 5.79: Teor de água de amassadura, densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

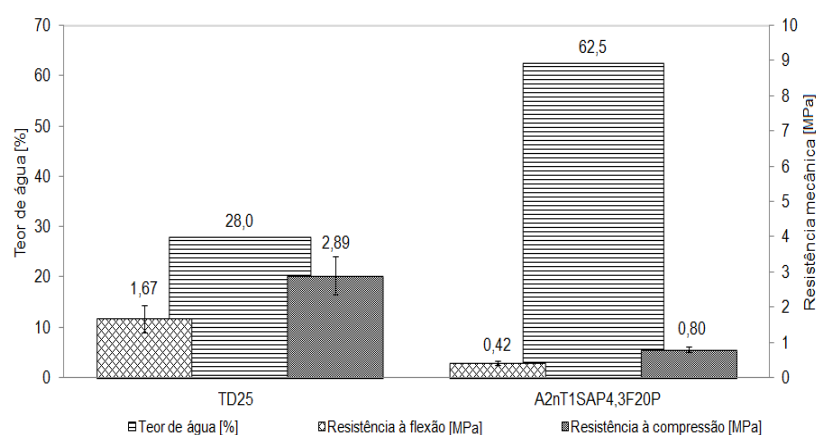


Figura 5.80: Teor de água de amassadura e propriedades mecânicas das argamassas TD25 e A2nT1SAP4,3F20P.

Avaliou-se também a retração com o tempo de cura, para inferir a tendência de fissuração (Figura 5.81). Após uma fase inicial de cura que causa maior retração (até 7 dias), o comportamento da argamassa padrão estabiliza. Já a formulação A2nT1SAP4,3F20P sofre menor retração inicial mas a mesma prolonga-se sem estabilizar, acabando por superar o valor de referência. Não sendo visíveis indícios de fissuração, será prudente estender o estudo do novo material A2nT1SAP4,3F20P para verificar se ocorre estabilização.

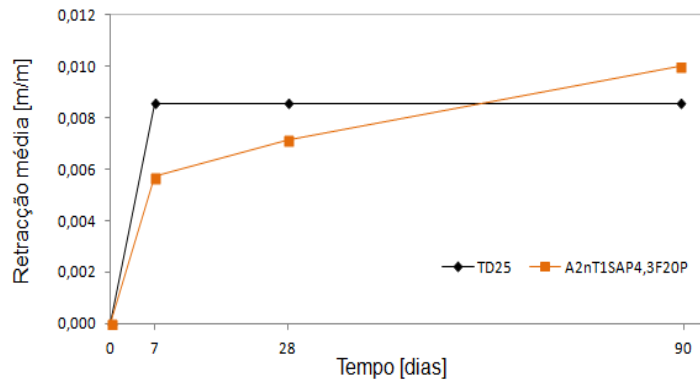


Figura 5.81: Evolução temporal da retração da argamassas TD25 e da argamassa A2nT1SAP4,3F20P.

A determinação da aderência ao suporte (tijolo de alvenaria) procurou aferir a durabilidade e adesão das argamassas. A argamassa TD25 apresentou um resistência média à ruptura por arrancamento de $0,013 \text{ MPa}$ sendo de $0,063 \text{ MPa}$ na argamassa A2nT1SAP4,3F20P. Além disso, a rutura na argamassa TD25 ocorreu na própria argamassa, enquanto na argamassa A2nT1SAP4,3F20P a rutura verifica-se na interface com o tijolo. Apesar da argamassa A2nT1SAP4,3F20P apresentar uma rutura adesiva, e não coesiva como a argamassa TD25, a maior tensão de arrancamento suportada não demonstra a diminuição da aderência ao substrato.

A avaliação da porosidade superficial de ambas as argamassas pelo ensaio de *Krasten* possibilitou aferir a permeabilidade à água (líquida) sob baixa pressão. A argamassa TD25 apresentou um coeficiente de absorção superficial bastante inferior ao da argamassa A2nT1SAP4,3F20P. A presença de aditivos com elevada afinidade hídrica e a elevada porosidade aberta da argamassa A2nT1SAP4,3F20P são responsáveis por esta diferença, existindo coerência com os resultados de absorção de água por capilaridade (Figura 5.82).

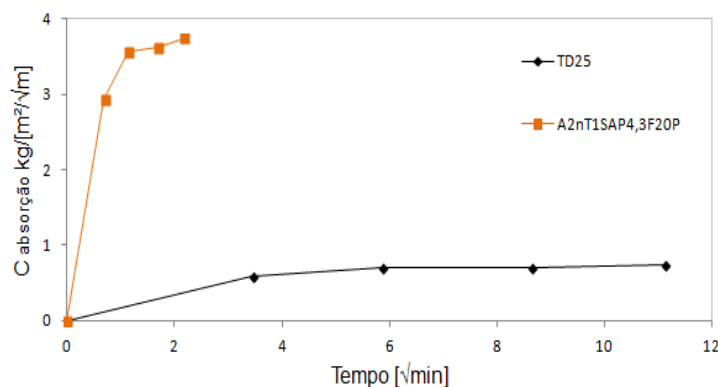


Figura 5.82: Evolução temporal da absorção superficial da argamassa TD25 e da argamassa A2nT1SAP4,3F20P.

Caracterização funcional da argamassa contendo três tipos de aditivos

Modelação térmica

Para avaliação do comportamento térmico das argamassas segundo o descrito em 4.1, compararam-se as argamassas TD25, A20P e A2nT1SAP4,3F20P. Como ensaio preliminar avaliou-se a evolução da temperatura na fase oposta à placa de aquecimento registada a cada 5 minutos. Este ensaio preliminar mostra de uma maneira bastante pictórica e de fácil percepção, que a adição de diversos aditivos juntamente com *PCM* reduz a capacidade de acumulação térmica das argamassas (Figura 5.83).

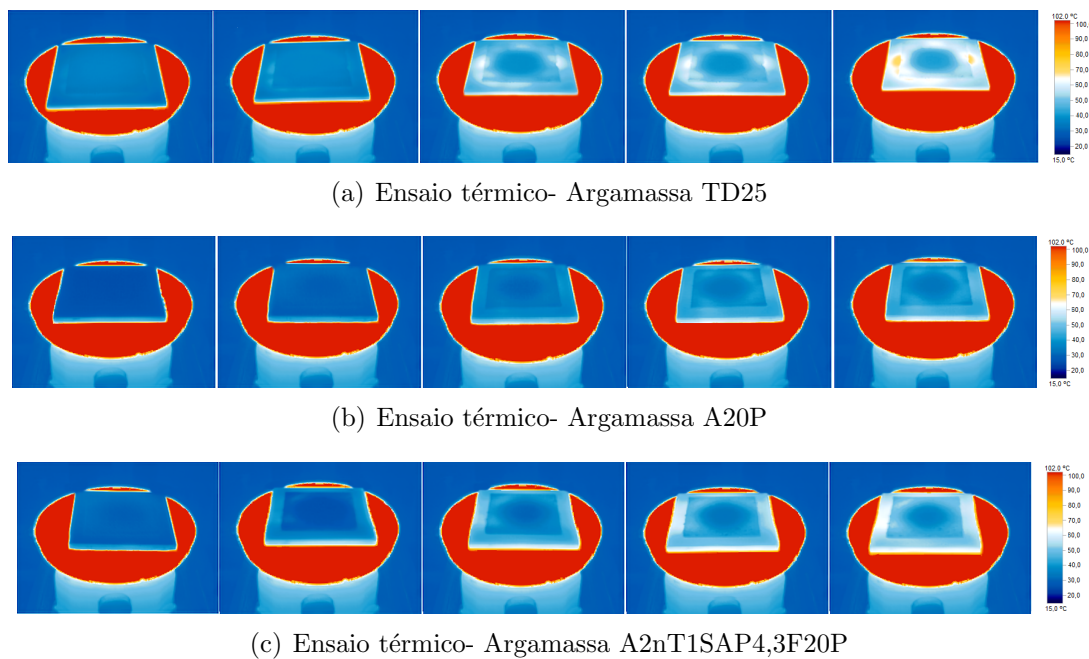


Figura 5.83: Evolução temporal da temperatura à superfície dos corpos.

O protótipo revestido pela formulação A2nT1SAP4,3F20P, quando sujeito a oscilações de temperatura (descritas em 5.2.2), confirma o inferior desempenho térmico desta argamassa relativamente à argamassa A20P.

Na fase de aquecimento a argamassa A2nT1SAP4,3F20P diminui a temperatura máxima em $1,7^{\circ}\text{C}$ relativamente à argamassa TD25, ou seja, reduz em 50% o corte térmico verificado com a argamassa A20P (Figura 5.84). Apesar das Fb_{Cel} possuírem características isolantes, a reduzida densidade da argamassa A2nT1SAP4,3F20P traduz-se na diminuição da massa térmica do material. Na Figura 5.84 é possível observar que no início da fase de aquecimento a temperatura registada no protótipo revestido por argamassa A2nT1SAP4,3F20P é ligeiramente superior à do protótipo revestido por argamassa TD25. Na fase inicial de aquecimento a temperatura do meio envolvente é inferior à temperatura de fusão do *PCM*. Desta forma, a temperatura não é suficiente para que o *PCM* acumule energia, sendo a massa térmica dos materiais a causa das diferenças de temperaturas

registadas. Na fase de arrefecimento o comportamento térmico das argamassas A20P e A2nT1SAP4,3F20P é mais próximo (Figura 5.84).

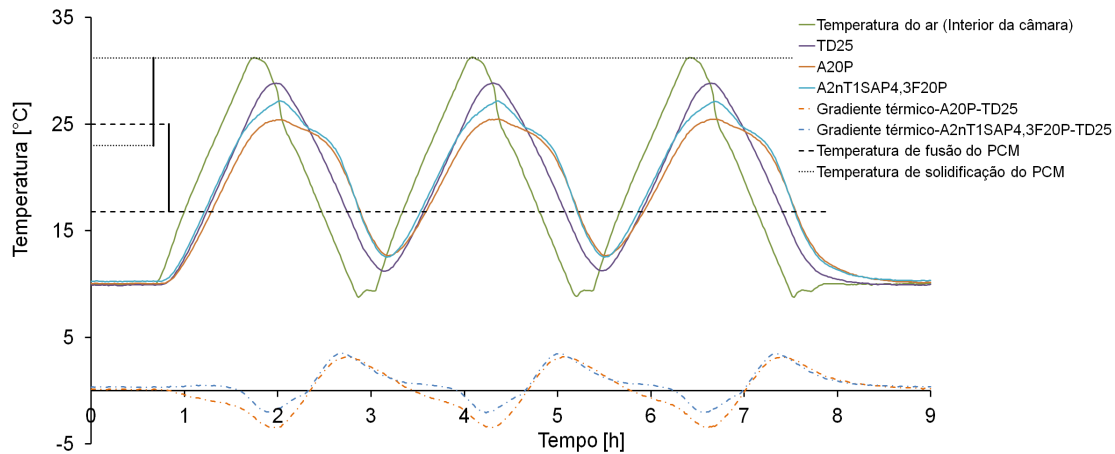


Figura 5.84: Temperatura e gradiente térmico em função de tempo durante o perfil 1 de temperaturas.

A variação do gradiente térmico registado no interior dos protótipos reflete a diferença comportamental entre as três argamassas. A introdução de *PCM* isoladamente na formulação da argamassa TD25 reduz cerca de $4,8^{\circ}\text{C}$ (-27%) o gradiente térmico registado, enquanto que a conjugação com outros aditivos apenas assegura a redução do gradiente térmico em $3,0^{\circ}\text{C}$ (-17%).

A análise da temperatura no interior dos protótipos em função do tempo revela diferenças consideráveis. A diferença máxima de temperatura na fase de aquecimento entre as argamassas A20P e TD25 foi de $3,5^{\circ}\text{C}$, sendo de apenas $2,1^{\circ}\text{C}$ com argamassa A2nT1SAP4,3F20P. Já na fase de arrefecimento o novo material A2nT1SAP4,3F20P apresenta melhores resultados que A20P, garantindo atenuação de $3,5^{\circ}\text{C}$, ou seja, um acréscimo de $0,3^{\circ}\text{C}$ relativamente à temperatura mínima de A20P (Figura 5.84).

Durante a fase de aquecimento a diferença máxima de temperaturas entre TD25 e A20P coincide com as maiores temperaturas registadas. Por sua vez, a diferença máxima de temperaturas entre TD25 e A2nT1SAP4,3F20P não coincide com este momento, existindo ao longo da fase de aquecimento diferenças superiores ($+0,4^{\circ}\text{C}$) às existentes aquando a temperatura no interior dos protótipos é máxima. Na fase de arrefecimento o comportamento térmico dos protótipos é similar não existindo diferenças significativas. Não se registou a existência de atraso térmico em ambas as fases.

O efeito térmico dos aditivos funcionais tende a diminuir com o afastamento da temperatura da envolvente relativamente à temperatura de transição de fase. Para comparar plenamente o desempenho de A2nT1SAP4,3F20P com TD25 e A20P, submeteu-se este material a um ciclo de temperaturas mais severo (perfil 2), descrito em 4.1.

Os resultados apresentados na Figura 5.85 corroboram a tendência de diminuição da atenuação térmica com o aumento da amplitude térmica do meio envolvente. Devido à baixa massa térmica, o protótipo A2nT1SAP4,3F20P que apresenta temperaturas superiores ao protótipo TD25 antes do efeito do PCM ser visível e após a anulação desse mesmo efeito pelo aumento da temperatura da envolvente (Figura 5.85).

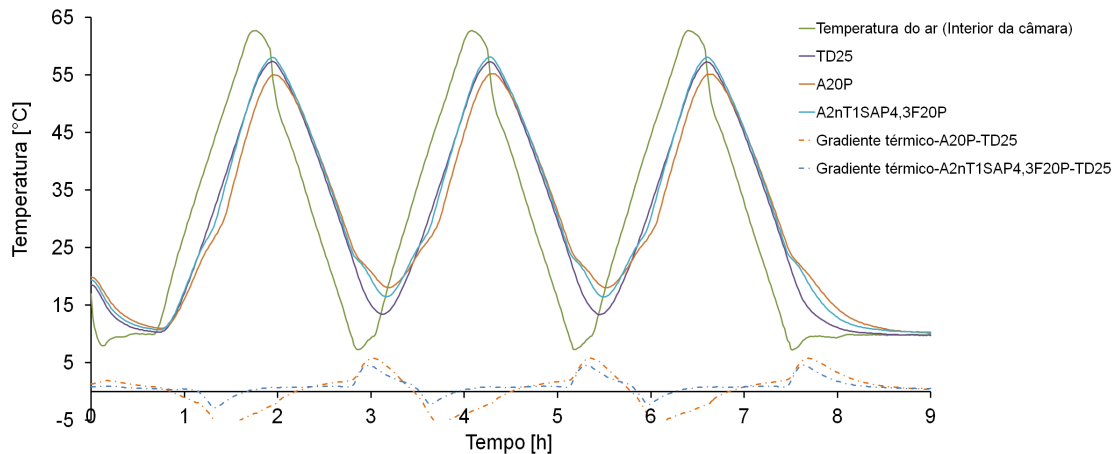


Figura 5.85: Temperatura e gradiente térmico em função de tempo durante o perfil 2 de temperaturas.

Fez-se também variar a percentagem de humidade relativa procurando aferir a sua influência no desempenho térmico das argamassas (Figura 5.86). O preenchimento de vazios por moléculas de água altera a condutividade do material e a entalpia de fusão do *PCM*. A temperatura e humidade relativa da envolvente; a diferença entre os pontos de fusão/solidificação e a temperatura máxima/mínima do meio; a presença de aditivos com elevada afinidade a moléculas de água e a massa térmica da argamassa condicionam fortemente a atenuação térmica conseguida.

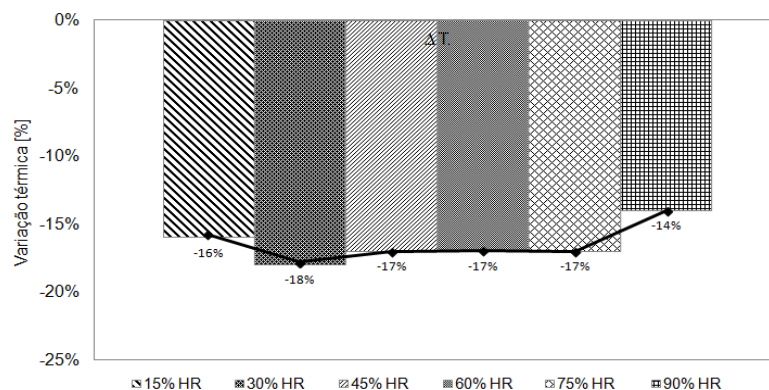


Figura 5.86: Variação do impacto térmico da argamassa A2nT1SAP4,3F20P em função do teor de humidade relativa.

Atividade fotocatalítica

Testou-se a argamassa A2nT1SAP4,3F20P em ensaios de descontaminação semelhantes aos descritos em 5.2.3. Não se utilizou radiação visível, tendo em consideração os resultados obtidos em 5.2.3. Os resultados obtidos sob irradiação solar foram comparados com os da argamassa A2nT.

Com concentração de 0,2 ppmv no interior do reator a percentagem de degradação de NO_x conseguida com a argamassa A2nT1SAP4,3F20P é menor ($\simeq 50\%$) que a obtida com a argamassa A2nT (Figura 5.87). A constante cinética de pseudo primeira ordem apresenta uma redução semelhante (Tabela 5.21). O desempenho fotocatalítico da argamassa A2nT1SAP4,3F20P foi superior ao da argamassa TD25, mineralizando uma maior quantidade de NO_x .

As amostras A2nT1SAP4,3F20P foram usadas num segundo ensaio de degradação tendo-se verificando a repetibilidade do desempenho fotocatalítico.

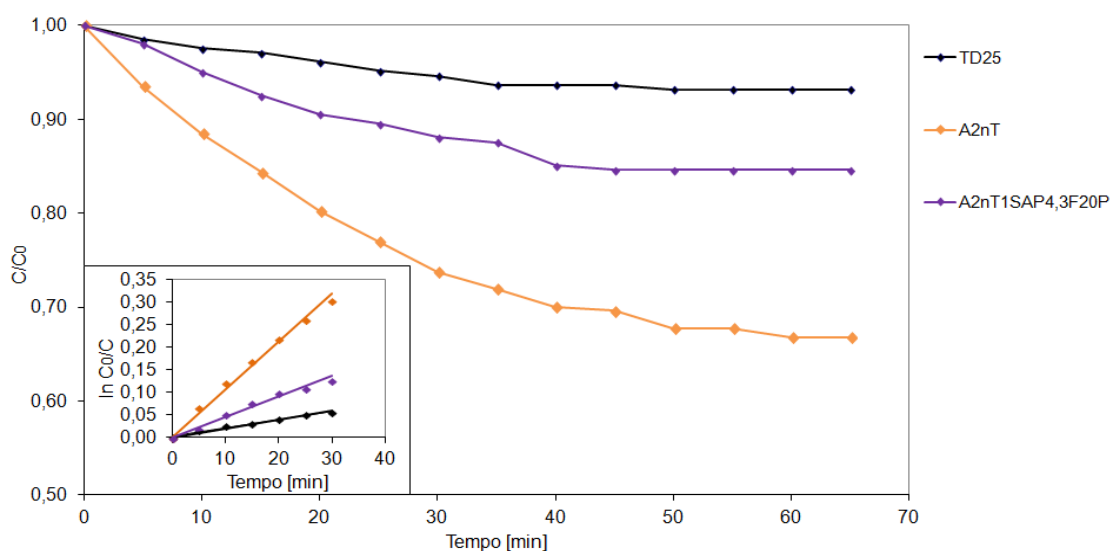


Figura 5.87: Diminuição da concentração de NO_x sob irradiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,2 ppmv).

Tabela 5.21: Taxa de degradação de NO_x , avaliada pela constante cinética de pseudo primeira ordem e respetivos coeficientes de correlação.

Amostra	0,2 ppmv-R. Solar		0,5 ppmv-R. Solar	
	$K_{30} \times 10^{-3}$ [min ⁻¹]	R ²	$K_{30} \times 10^{-3}$ [min ⁻¹]	R ²
TD25	2,00	0,97	0,60	0,99
A2nT	10,63	0,99	4,14	0,98
A2nT1SAP4,3F20P	4,54	0,98	1,95	0,96

A argamassa A2nT1SAP4,3F20P foi também testada com uma concentração de NO_x de 0,5 ppmv. Na Figura 5.88 é possível verificar que a capacidade de mineralização de poluentes gasosos da argamassa A2nT1SAP4,3F20P diminui quando exposta a maiores concentrações de poluente.

O desempenho da argamassa A2nT1SAP4,3F20P é inferior ao da argamassa A2nT, verificando-se a diminuição da percentagem de NO_x mineralizado. A constante cinética de pseudo primeira ordem corrobora a menor atividade da argamassa A2nT1SAP4,3F20P face à argamassa A2nT (Tabela 5.21).

A Figura 5.89 apresenta a síntese das taxas de degradação fotocatalítica obtidas com as argamassas TD25, A2nT e A2nT1SAP4,3F20P.

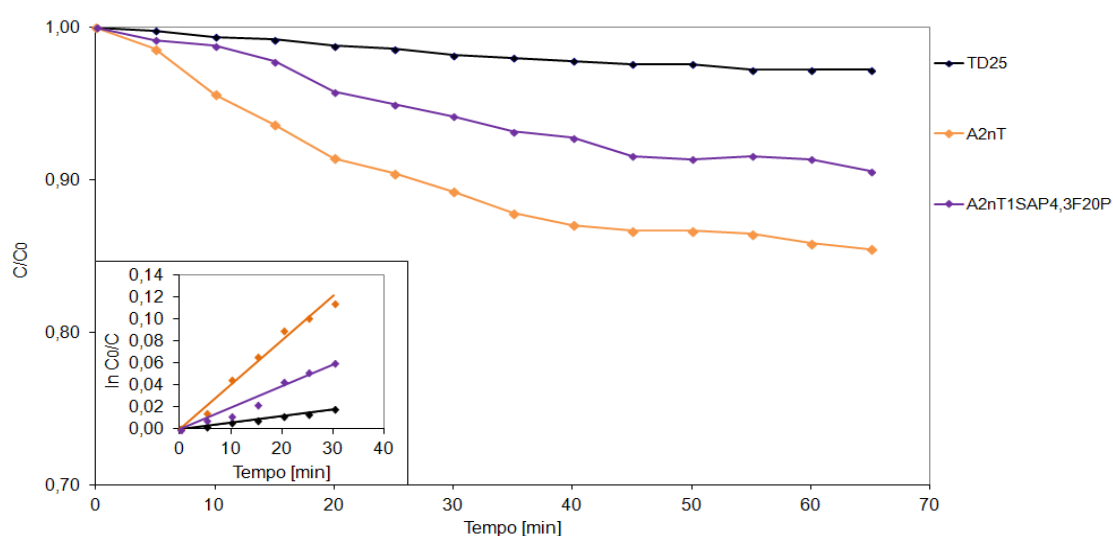


Figura 5.88: Diminuição da concentração de NO_x sob irradiação solar (Concentração inicial de NO_x -0,5 ppmv).

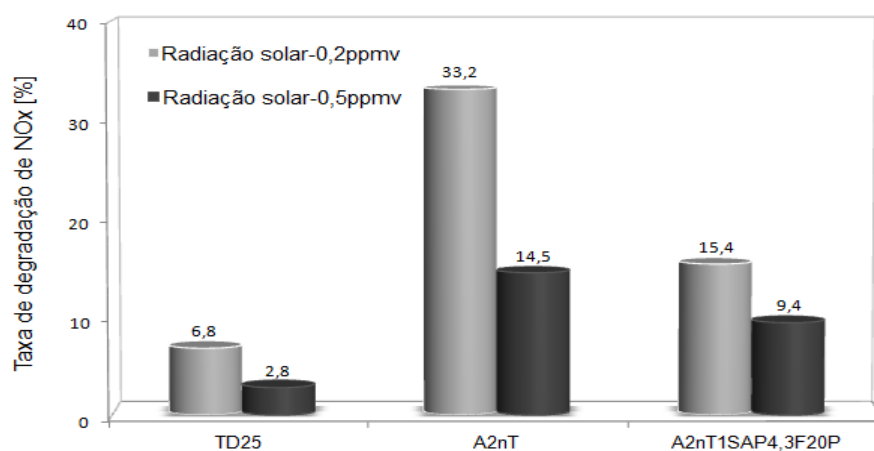


Figura 5.89: Taxa de degradação fotocatalítica de NO_x das argamassas TD25, A2nT e A2nT1SAP4,3F20P.

A adição conjunta de diversos aditivos não favorece o desempenho fotocatalítico das argamassas. Mais uma vez, a análise de SEM/EDS permitiu quantificar a quantidade de TiO_2 à superfície das amostras (Tabela 5.22). A gradação existente explica as diferenças de desempenho.

Tabela 5.22: Massa de TiO_2 na superfície das amostras estimado por EDS/SEM.

Amostra	C norm.[wt%]
TD25	2,64
A2nT	4,52
A2nT1SAP4,3F20P	3,12

Na Figura 5.90 é possível verificar como as partículas de TiO_2 se distribuem na superfície da argamassa A2nT1SAP4,3F20P. Devido à sua fina granulometria as partículas de TiO_2 facilmente se alojam no interior da estrutura tridimensional complexa das fibras de celulose. Desta forma, parte significativa do TiO_2 não se encontra exposto a irradiação.

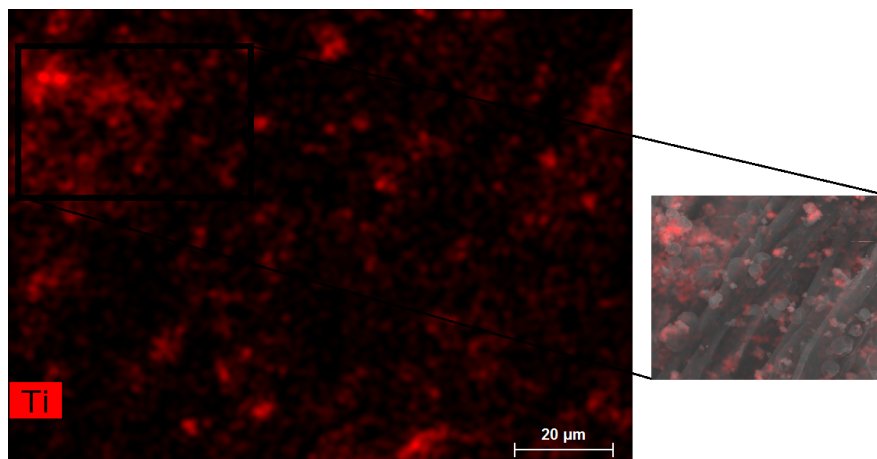


Figura 5.90: Distribuição superficial das partículas de TiO_2 na superfície da argamassa A2nT1SAP4,3F20P.

A mesma gradação comportamental entre as diferentes argamassas foi observada na descoloração de RhB (Tabela 5.23).

Tabela 5.23: Taxa de degradação de RhB sob irradiação solar.

Amostra	Taxa de RhB degradado[%]
TD25	13,3
A2nT	37,9
A2nT1SAP4,3F20P	15,0

Comportamento higroscópico

A Tabela 5.24 mostra a massa de água absorvida e libertada durante cada ciclo de exposição a variações de humidade relativa impostas segundo a metodologia *NordTest*. A argamassa A2nT1SAP4,3F20P exibe um comportamento bastante regular. Ao fim de cada ciclo, a variação de massa é razoavelmente constante (Figura 5.91).

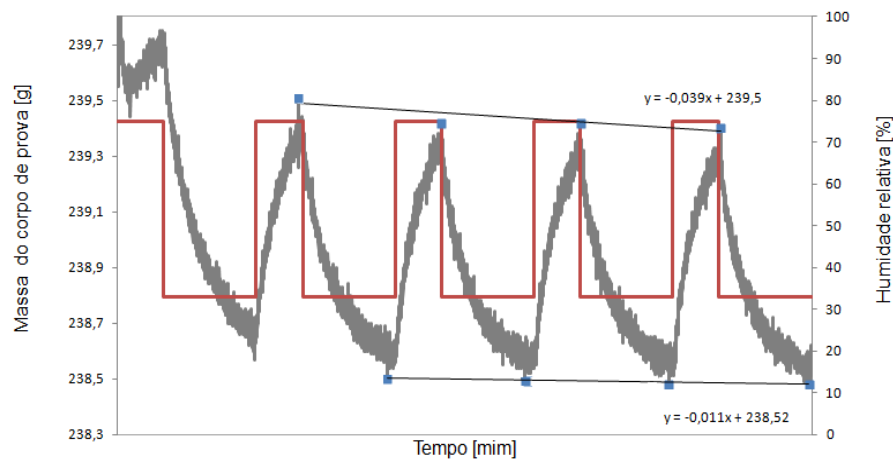


Figura 5.91: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP4,3F20P registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

Ainda assim o valor de *MBV* da argamassa A2nT1SAP4,3F20P é inferior ao exibido pela formulação equivalente sem *PCM* (Tabela 5.24). Esta constatação confirma que a capacidade higroscópica é sobretudo controlada pela distribuição de tamanho dos poros. Se por um lado a adição de *PCM* contribui para a obtenção de maiores velocidades de absorção de água por capilaridade, indicando maior sucção capilar, por outro lado reduz a performance higroscópica da argamassa indicando a existência de poros de maiores dimensões. Embora não se tenha avaliado a distribuição do tamanho dos poros, é crível admitir que a introdução de *PCM* contribua para o aumento do tamanho médio dos poros.

Tabela 5.24: Massa de água absorvida e libertada longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest* e valor de *MBV* daa argamassa A2nT1SAP4,3F20P.

Amostra	Ciclo	Massa abs. [g]	Massa lib. [g]	MBV [g/m ² Δ%HR]
A2nT1SAP4,3F20P	1	0,92	0,98	1,95
	2	0,87	0,88	
	3	0,88	0,90	
	4	0,88	0,88	

Os resultados obtidos permitem perceber que a tentativa de garantir a multifuncionalidade pelo uso conjunto de diferentes aditivos, diminui o desempenho numa vertente específica. Ainda assim, o decréscimo é relativamente limitado quando ajustada a formulação, pelo que é possível obter argamassas que desempenhem múltiplas funções de ajuste térmico, higroscópico e de descontaminação de agentes poluentes.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho teve como objetivo aferir a possibilidade de formulação de argamassas com elevado desempenho funcional a diversos níveis. Partindo-se de uma argamassa comercial pré-doseada testou-se a incorporação de diversos aditivos. Os aditivos selecionados conferiram à argamassa a capacidade de: (i) retenção e liberação de calor latente (*PCM*), (ii) mineralização de poluentes gasosos (TiO_2) e (iii) retenção e restituição de grandes quantidades de água à envolvente (*SAP*; V_{er} ; Fb_{Cel} e C_{rt}).

Os vários aditivos utilizados provocaram, naturalmente, alterações nas estruturas e propriedades físicas e mecânicas da argamassa. A adição de partículas de granulometria fina ou com grande afinidade com as moléculas de água, aumentou de forma considerável a quantidade de água comprometida durante o processo de hidratação. Desta forma, os aditivos testados requereram uma considerável diminuição da razão sólido-líquido para que se mantivesse a consistência e trabalhabilidade pretendida.

De uma forma geral, observou-se que a porosidade aberta, a densidade aparente e o módulo de elasticidade são fortemente dependentes do teor de água de amassadura, e portanto, da dosagem dos aditivos. O aumento do teor de água resulta na diminuição generalizada das propriedades mecânicas das argamassas.

O desempenho funcional foi estudado a diferentes níveis permitindo obter as seguintes conclusões:

A adição de *PCM* resultou numa diminuição do gradiente térmico registado, conferindo às argamassas a capacidade de modelação térmica do meio onde se encontram. Não foi registada a ocorrência de atraso térmico significativo em nenhuma das formulações testadas. Comprovou-se ainda que, a adição conjunta com outros materiais reduz o benefício térmico da adição de *PCM*. Ainda assim, demonstrou-se a possibilidade de projetar argamassas que sejam uma solução de compromisso pretendendo conjugar diversas funcionalidades.

Também a influência das condições de serviço foi aferida, verificando-se que condicionam o desempenho térmico das argamassas com *PCM*, sendo a temperatura da envolvente o principal factor condicionante.

O TiO_2 utilizado no presente trabalho com a pretensão de conferir às argamas-

sas a capacidade de degradação de poluentes gasosos não demonstrou tal capacidade sob irradiação visível, excluindo assim a possibilidade da sua incorporação em argamassas destinadas a ambientes iluminados exclusivamente de forma artificial. Contudo, a presença de irradiação solar possibilita que os processos de fotocatalise heterogênea se desencadeiem. Demonstrou-se que a capacidade de degradação de NO_x pelas argamassas é proporcional à quantidade de TiO_2 presente na sua superfície. Quando adicionado individualmente, maiores teores de adição refletem-se de forma direta na quantidade de TiO_2 na superfície das argamassas. Ensaio de descoloração de RhB corroboraram a maior atividade fotocatalítica das argamassas onde o teor de TiO_2 adicionado foi superior. A concentração de poluente na atmosfera não alterou esta tendência.

Para garantia das propriedades mecânicas, na formulação de argamassas bi e multifuncionais, houve a limitação do teor de TiO_2 a 2%. A tentativa de garantir a multifuncionalidade das argamassas, resultou num decréscimo do desempenho fotocatalítico. As complexas alterações estruturais resultam na diminuição da quantidade de TiO_2 presente na superfície das argamassas.

Para melhoria do comportamento higroscópico das argamassas incorporaram-se diversos aditivos, individual e conjuntamente.

A adição de partículas de *SAP* foi a que, individualmente, garantiu os melhores valores de *MBV*, conseguindo-se um material com a classificação de "Bom", segundo a metodologia *NordTest*. Também a nível mecânico a adição de *SAP* apresentou-se como sendo aquela que induz menores reduções das propriedades mecânicas.

A adição de Fb_{Cel} também contribuiu para a melhoria significativa do valor de *MBV* das argamassas, contudo a um nível inferior ao registado com a adição de *SAP*. Os restantes aditivos quando adicionados individualmente não melhoraram o comportamento higroscópico das argamassas.

Tentando formular argamassas com "Excelente" comportamento higroscópico segundo a metodologia *NordTest* prepararam-se misturas conjugando 1% de *SAP* com *Ver*, Fb_{Cel} e C_{rt} . A adição conjunta destes aditivos permitiu perceber que as Fb_{Cel} , além de revelarem competência a nível higroscópico quando adicionadas individualmente, também são passíveis de conjugar com partículas de *SAP*, incrementando de forma notória o valor de *MBV*. As restantes misturas apresentaram comportamento higroscópico inferior ao da argamassa contendo apenas 1% de *SAP*, sendo portanto, insatisfatório.

Na formulação de argamassas bi e multifuncionais comprovou-se, uma vez mais, a influência dos diferentes aditivos e das suas interações no arranjo estrutural e desempenho funcional das argamassas. A adição de TiO_2 contribui para a melhoria do comportamento higroscópico, enquanto a adição de *PCM* tem o efeito inverso.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que a tentativa de garantir a multifuncionalidade das argamassas condiciona o seu desempenho numa vertente específica. Todavia, o decréscimo funcional é limitado podendo ser controlado através do ajuste das formulações.

Bibliografia

- [1] P. Pérez-Lombard, J. Ortiz, e C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394 – 398, 2008.
- [2] B. Kolarik, P. Wargocki, A. Skorek-Osikowska, e A. Wisthaler. The effect of a photocatalytic air purifier on indoor air quality quantified using different measuring methods. *Building and Environment*, 45(6):1434 – 1440, 2010.
- [3] A.P. Jones. Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33(28):4535 – 4564, 1999.
- [4] P. Kolodziej e J. Rak. Responsive building envelope as a material system of autonomous agents. Em *18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, páginas 945–954, 2013.
- [5] C. Sjostrom e W. Bakens. Cib agenda 21 for sustainable construction: why, how and what. *Building Research and Information*, 27(6):347–353, 1999.
- [6] L. Itard. Lifecycle design of buildings, systems and materials. *CIB W115 Construction MaterialStewardship*, 2009.
- [7] C. J. Kibert. *Sustainable construction green building design and delivery*. 2nd Ed., 2008.
- [8] M. R. Veiga. Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. Tese de mestrado, Universidade do Porto, 1998.
- [9] P. Isolani. Eficiência energética nos edifícios residenciais. *Lisboa: DECO*, 2008.
- [10] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, e O. Zubillaga. Use of microencapsulated pcm in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39(2):113–119, 2007.
- [11] A.M. Khudhair e M.M. Farid. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2):263–275, 2004.

- [12] S. Cunha, V. Alves, J.B. Aguiar, e V.M. Ferreira. Use of phase change materials microcapsules in aerial lime and gypsum mortars. *Cement, Wapno, Beton*, (SPECIAL ISSUE):17–21, 2012.
- [13] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, e T. Akiyama. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2):1373–1391, 2011.
- [14] L. Ventolà, M. Vendrell, e P. Giraldez. Newly-designed traditional lime mortar with a phase change material as an additive. *Construction and Building Materials*, 47:1210–1216, 2013.
- [15] A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, e A.H.M.E. Reinders. Experimental research on the use of micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in dutch houses. *Solar Energy*, 85(5):1007–1020, 2011.
- [16] S.S. Lucas, V.M. Ferreira, e J.L.B.D. Aguiar. Latent heat storage in pcm containing mortars - study of microstructural modifications. *Energy and Buildings*, 66:724–731, 2013.
- [17] V.V. Tyagi e D. Buddhi. Pcm thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6):1146–1166, 2007.
- [18] B. Zalba, J.M. Maran, L.F. Cabeza, e H. Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3):251–283, 2003.
- [19] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, e A.I. Fernandez. Materials used as pcm in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3):1675–1695, 2011.
- [20] A. Sharma, S.D. Sharma, e D. Buddhi. Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications. *Energy Conversion and Management*, 43(14):1923–1930, 2002.
- [21] D. Feldman, D. Banu, e D. Hawes. Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36(3):311–322, 1995.
- [22] A. Sari e K. Kaygusuz. Some fatty acids used for latent heat storage: Thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling. *Renewable Energy*, 28(6):939–948, 2003.
- [23] A. Sari. Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: Preparation and thermal properties. *Energy Conversion and Management*, 45(13-14):2033–2042, 2004.

- [24] K. Cho e S.H. Choi. Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(17):3183–3196, 2000.
- [25] D. Zhou, C.Y. Zhao, e Y. Tian. Review on thermal energy storage with phase change materials (pcms) in building applications. *Applied Energy*, 92(0):593 – 605, 2012.
- [26] R.M. Novais, G. Ascensao, M.P Seabra, e J. A. Labrincha. Ceramic tiles for indoor temperature control. *Energy and Buildings*, 2015 (submetido).
- [27] M. Schmidt. Phase change materials–latent heat storage for interior climate control. *BASF, Ludwigshafen, Germany*, 2007.
- [28] A. Loxley e B. Vincent. Preparation of poly(methylmethacrylate) microcapsules with liquid cores. *Journal of Colloid and Interface Science*, 208(1):49–62, 1998.
- [29] C. Castellón, C.n, I. Martorell, L.F. Cabeza, A.I. Fernannde, e A.M. Manich. Compatibility of plastic with phase change materials (pcm). *International Journal of Energy Research*, 35(9):765–771, 2011.
- [30] M.S. Uddin, H.J. Zhu, e M.N.A. Hawlader. Effects of cyclic operation on the characteristics of a microencapsulated pcm storage material. *International Journal of Solar Energy*, 22(3-4):105–114, 2002.
- [31] I. Carvalho. Dimensionamento de um sistema de teto arrefecido integrando materiais de mudança de fase. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [32] Y. Cai, Q. Wei, F. Huang, S. Lin, F. Chen, e W. Gao. Thermal stability, latent heat and flame retardant properties of the thermal energy storage phase change materials based on paraffin/high density polyethylene composites. *Renewable Energy*, 34(10):2117–2123, 2009.
- [33] I. Salyer e A. Sircar. Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications. volume 4, páginas 236–243, 1990.
- [34] D. Banu, D. Feldman, F. Haghighat, J. Paris, e D. Hawes. Energy-storing wallboard: Flammability tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2):98–105, 1998.
- [35] G. Song, S. Ma, G. Tang, Z. Yin, e X. Wang. Preparation and characterization of flame retardant form-stable phase change materials composed by epdm, paraffin and nano magnesium hydroxide. *Energy*, 35(5):2179–2183, 2010.
- [36] A. Fujishima, X. Zhang, e D. Tryk. Tio 2 photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12):515 – 582, 2008.

- [37] O. Carp, C.L. Huisman, e A. Reller. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progress in Solid State Chemistry*, 32(1-2):33–177, 2004.
- [38] G.C. Allen, A. El-Turki, K.R. Hallam, D. McLaughlin, e M. Stacey. Role of no₂ and so₂ in degradation of limestone. *British Corrosion Journal*, 35(1):35–38, 2000.
- [39] H. Honda, A. Ishizaki, R. Soma, K. Hashimoto, e A. Fujishima. Application of photocatalytic reactions caused by tio₂ film to improve the maintenance factor of lighting systems. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27(1):42–47, 1998.
- [40] B. Bhushan. *Springer handbook of nanotechnology*. Springer, 2010.
- [41] A.G. Mamalis, L.O.G. Vogtlander, e A. Markopoulos. Nanotechnology and nanostructured materials: Trends in carbon nanotubes. *Precision Engineering*, 28(1):16–30, 2004.
- [42] B.Y. Lee, A.R. Jayapalan, M.H. Bergin, e K.E. Kurtis. Photocatalytic cement exposed to nitrogen oxides: Effect of oxidation and binding. *Cement and Concrete Research*, 60:30–36, 2014.
- [43] M.M. Hassan, H. Dylla, L.N. Mohammad, e T. Rupnow. Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(8):1456–1461, 2010.
- [44] A.M. Ramirez, K. Demeestere, N. De Belie, T. Mantyla, e E. Levanen. Titanium dioxide coated cementitious materials for air purifying purposes: Preparation, characterization and toluene removal potential. *Building and Environment*, 45(4):832–838, 2010.
- [45] A. Jacobsen. Titanium dioxide pigments: Correlation between photochemical reactivity and chalking. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(3):523–526, 1949.
- [46] J.C. Kuriacose e M.C. Markham. Mechanism of the photo-initiated polymerization of methyl methacrylate at zinc oxide surfaces. *Journal of Physical Chemistry*, 65(12):2232–2236, 1961.
- [47] A. Fujishima e K. Honda. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, 238(5358):37–38, 1972.
- [48] A.L. Pruden e D.F. Ollis. Photoassisted heterogeneous catalysis: The degradation of trichloroethylene in water. *Journal of Catalysis*, 82(2):404–417, 1983.
- [49] A.L. Pruden e D.F. Ollis. Degradation of chloroform by photoassisted heterogeneous catalysis in dilute aqueous suspensions of titanium dioxide. *Environmental Science and Technology*, 17(10):628–631, 1983.

- [50] A.G. Agrios e P. Pichat. State of the art and perspectives on materials and applications of photocatalysis over tio 2. *Journal of Applied Electrochemistry*, 35(7-8):655–663, 2005.
- [51] D. Beydoun, R. Amal, G. Low, e S. McEvoy. Role of nanoparticles in photocatalysis. *Journal of Nanoparticle Research*, 1(4):439–458, 1999.
- [52] R. Nogueira e W. Jardim. A fotocatalise heterogenea e sua aplicacao ambiental. *Quimica Nova*, 21(1):69–72, 1998.
- [53] M. Addamo, M. Bellardita, A. Di Paola, e L. Palmisano. Preparation and photoactivity of nanostructured anatase, rutile and brookite tio 2 thin films. *Chemical Communications*, (47):4943–4945, 2006.
- [54] P.K.J. Robertson. Semiconductor photocatalysis: An environmentally acceptable alternative production technique and effluent treatment process. *Journal of Cleaner Production*, 4(3-4):203–212, 1996.
- [55] I. Nakamura, N. Negishi, S. Kutsuna, T. Ihara, S. Sugihara, e K. Takeuchi. Role of oxygen vacancy in the plasma-treated tio 2 photocatalyst with visible light activity for no removal. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 161(1-2):205–212, 2000.
- [56] B. Ruot, A. Plassais, F. Olive, L. Guillot, e L. Bonafous. Tio 2-containing cement pastes and mortars: Measurements of the photocatalytic efficiency using a rhodamine b-based colourimetric test. *Solar Energy*, 83(10):1794–1801, 2009.
- [57] A. Fujishima, T.N. Rao, e D.A. Tryk. Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1(1):1–21, 2000.
- [58] J. Chen e C. Poon. Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9):1899–1906, 2009.
- [59] O. Geiss, C. Cacho, J. Barrero-Moreno, e D. Kotzias. Photocatalytic degradation of organic paint constituents-formation of carbonyls. *Building and Environment*, 48(1):107–112, 2012.
- [60] J.M. Herrmann. Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*, 53(1):115–129, 1999.
- [61] S. Devahasdin, C. Fan, K. Li, e D.H. Chen. Tio 2 photocatalytic oxidation of nitric oxide: Transient behavior and reaction kinetics. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 156(1-3):161–170, 2003.

- [62] U.I. Gaya e A.H. Abdullah. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 9(1):1–12, 2008.
- [63] G. Husken, M. Hunger, e H.J.H. Brouwers. Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. *Building and Environment*, 44(12):2463–2474, 2009.
- [64] S.S. Lucas. *Argamassas funcionais para uma construção sustentável*. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, 2011.
- [65] Y. Chapuis, D. Klvana, C. Guy, e J. Kirchnerova. Photocatalytic oxidation of volatile organic compounds using fluorescent visible light. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 52(7):845–854, 2002.
- [66] L. Zou, Y. Luo, M. Hooper, e Eric Hu. Removal of vocs by photocatalysis process using adsorption enhanced tio 2–sio 2 catalyst. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(11):959–964, 2006.
- [67] P. Venkata Laxma Reddy e Kim. A review of photocatalytic treatment for various air pollutants. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(3):181–188, 2011.
- [68] K. Nakata, T. Ochiai, Murakami T., e A. Fujishima. Photoenergy conversion with tio 2 photocatalysis: New materials and recent applications. *Electrochimica Acta*, 84(0):103 – 111, 2012.
- [69] M. V. Diamanti, M. Ormellese, e M. Pedferri. Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. *Cement and Concrete Research*, 38(11):1349 – 1353, 2008.
- [70] R.M. Dickhut, E.A. Canuel, K.E. Gustafson, K. Liu, K.M. Arzayus, S.E. Walker, G. Edgecombe, M.O. Gaylor, e E.H. MacDonald. Automotive sources of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particulate matter in the chesapeake bay region. *Environmental Science and Technology*, 34(21):4635–4640, 2000.
- [71] Y.L. Pang, A.Z. Abdullah, e S. Bhatia. Optimization of sonocatalytic degradation of rhodamine b in aqueous solution in the presence of tio 2 nanotubes using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 166(3):873–880, 2011.
- [72] L. Cassar, Y Miguel, A Porro, e PJM Bartos. *Nanotechnology and photocatalysis in cementitious materials Proc. 2nd Int. Symp. on Nanotechnology in Construction, Bilbao, Spain*. 277–283, 2005.

- [73] H. Gonçalves, B. Gonçalves, L. Silva, N. Vieira, F. Raupp-Pereira, L. Senff, e J.A. Labrincha. The influence of porogene additives on the properties of mortars used to control the ambient moisture. *Energy and Buildings*, 74:61–68, 2014.
- [74] L. Mortensen, C. Rode, e R. Peuhkuri. *Hygrothermal microclimate on interior surfaces of the building envelope*. Tese de doutoramento, Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Buildings and Energy Institut for Bygninger og Energi, 2007.
- [75] A.H. Holm, H.M. Kunzel, e K. Sedlbauer. Predicting indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. volume 110 PART II, páginas 820–826, 2004.
- [76] H. Yoshino, T. Mitamura, e K. Hasegawa. Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions. *Building and Environment*, 44(7):1418–1425, 2009.
- [77] G. A. Scheffler. *Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage*. Tese de doutoramento, Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, Germany, 2008.
- [78] C. Enright. Moisture in buildings: A single astm manual provides guidance for moisture control. *Standardization News*, 38(3), 2010.
- [79] C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, K. Svennberg, e T. Ojanen. Moisture buffer of building materials. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2005.
- [80] D.M. Tobaldi, B. Pullar, R. C.; Russel, J. Abelen, PF McMillan, M. Saeli, M.P Seabra, e J. A. Labrincha. Influence of sol counter-ions on the visible light induced photocatalytic behaviour of tio 2 nanoparticles. *Catalysis Science and Technology*, 4(7):2134–2146, 2014.
- [81] Q.L. Yu e H.J.H. Brouwers. Indoor air purification using heterogeneous photocatalytic oxidation. part i: Experimental study. *Applied Catalysis B: Environmental*, 92(3-4):454–461, 2009.
- [82] K. Demeestere, J. Dewulf, B. De Witte, A. Beeldens, e H. Van Langenhove. Heterogeneous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with tio 2. *Building and Environment*, 43(4):406–414, 2008.
- [83] N.M.M. Ramos, J.M.P.Q. Delgado, e V.P. De Freitas. Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building elements. *Construction and Building Materials*, 24(12):2590–2597, 2010.

- [84] C.F. Ferraris, V.A. Hackley, e A.I. Aviles. Measurement of particle size distribution in portland cement powder: Analysis of astm round robin studies. *Cement, Concrete and Aggregates*, 26(2):71–81, 2004.
- [85] C. Apps. *Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas*. Tese de doutoramento, IST, Lisboa, 2001.
- [86] D.S. Muggli e L. Ding. Photocatalytic performance of sulfated tio 2 and degussa p-25 tio 2 during oxidation of organics. *Applied Catalysis B: Environmental*, 32(3):181–194, 2001.
- [87] T.G. Nunes, G. Guillot, e J.M. Bordado. Low-, stray-field imaging and spectroscopic studies of the sodium polyacrylate water uptake. *Polymer*, 41(12):4643–4649, 2000.
- [88] S. Cerolini, M. D’Orazio, C. Di Perna, e A. Stazi. Moisture buffering capacity of highly absorbing materials. *Energy and Buildings*, 41(2):164 – 168, 2009.
- [89] Y. El Mouzdahir, A. Elmchaouri, R. Mahboud, A. Gil, e SA. Korili. Synthesis of nano-layered vermiculite of low density thermal treatment. *Powder Technology*, 189(1):2–5, 2009.
- [90] A. M.C. Moraes, A. C. Moreira, e C. R. Appoloni. Determinação da porosidade da cortiça através da metodologia de transmissão de raios gama e análise de imagens de microscopia eletrónica de varredura. Em *International Nuclear Atlantic Conference*, 2007.
- [91] L. Gil. *Cortiça-Produção Tecnologia e Aplicação*. Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisboa, 1998.
- [92] L.M. Silva, R.A. Ribeiro, J.A. Labrincha, e V.M. Ferreira. Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar. *Cement and Concrete Composites*, 32(1):19 – 24, 2010.
- [93] I. Flores-Colen. *Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva*. Tese de doutoramento, Lisbon: Instituto Superior Técnico, 2009.
- [94] S. Omran, P. Heggs, e Y. Ding. The influence of moisture content on the evaluation of latent heat of molten salts used for thermal energy storage applications. volume 46, páginas 317–323, 2014.
- [95] A. Kaci, M. Chaouche, P.A. Andreani, e H. Brossas. Rheological behaviour of render mortars. *Applied Rheology*, 19(1):13794–1–13794–8, 2009.

Apêndice A

Apêndice - Síntese das propriedades físicas e mecânicas das argamassas

Tabela A.1: Propriedades físicas e mecânicas da argamassa referência e de argamassas monoaditivadas (parte 1).

Amostra	Teor de água [%]	Densidade aparente [Kg/m ³]	Mód. de elasticidade [MPa]	Resist. à flexão [MPa]	Resist. à compressão [MPa]
TD25 (* ¹)	30,0	-	-	1,64	2,63
TD25 (* ²)	28,0	1486	4206	1,67	2,89
A20P	37,0	1270	1482	1,05	2,32
A1nT	29,0	1382	2309	1,66	2,86
A2nT	32,0	1212	1144	0,75	1,52
A4nT	42,0	1079	805	0,28	0,56
A0,5SAP	32,5	1390	3057	1,15	1,89
A1SAP	35,0	1333	2777	0,88	1,38
A1,5SAP	37,0	1292	2205	0,77	1,30
A5V	37,5	1154	2238	1,50	2,04
A7,5V	45,0	979	1523	0,84	1,11
A10V	50,0	931	1479	0,76	1,04
A15V	61,0	767	1270	0,51	0,51
A2,2F	37,8	1317	2192	1,34	2,30
A4,3F	53,2	1134	1270	0,89	1,12
A6,3F	68,7	999	692	0,49	0,64
A2,4C	37,6	1209	1627	1,30	0,82
A4,7C	52,6	972	859	0,80	0,55
A6,9C	67,7	834	480	0,41	0,29

* Apenas os valores médios são apresentados sendo os respectivos desvios padrão apresentados no corpo do texto.

*¹ Formulação preparada sem adição de superplastificante.

*² Formulação preparada com teor de adição de superplastificante de 0,25% e tomada como referência.

Tabela A.2: Propriedades físicas e mecânicas da argamassa referência e de argamassas monoaditivadas (parte 2).

Amostra	Porosidade aberta [%]	Absorção de água [%]	Coef. de capilaridade [Kg/m ² .√min]	Valor assintótico [Kg/m ²]	Índice de secagem [Kg/(m ² .h)]
TD25 (* ¹)	-	-	-	-	-
TD25 (* ²)	26,9	18,1	0,44	18,98	0,055
A20P	29,7	23,4	0,95	20,23	0,103
A1nT	32,4	23,5	0,85	20,50	0,371
A2nT	46,1	38,1	1,18	26,55	0,386
A4nT	51,1	47,5	1,29	29,21	0,395
A0,5SAP	27,8	20,0	1,44	24,76	0,032
A1SAP	30,7	23,0	1,60	26,28	0,035
A1,5SAP	31,1	24,1	1,57	26,55	0,037
A5V	28,0	24,2	0,84	22,54	0,047
A7,5V	32,0	32,7	1,38	32,64	0,052
A10V	33,2	35,6	1,46	33,69	0,053
A15V	37,2	48,6	2,04	36,86	0,058
A2,2F	30,3	23,0	1,06	28,38	0,083
A4,3F	37,0	32,6	2,79	32,46	0,052
A6,3F	43,8	43,8	2,94	37,56	0,061
A2,4C	27,1	22,4	0,80	26,16	0,026
A4,7C	32,8	33,8	2,30	28,85	0,049
A6,9C	38,5	43,8	2,81	32,08	0,035

* Apenas os valores médios são apresentados sendo os respectivos desvios padrão apresentados no corpo do texto.

*¹ Formulação preparada sem adição de superplastificante.

*² Formulação preparada com teor de adição de superplastificante de 0,25% e tomada como referência.

Tabela A.3: Propriedades físicas e mecânicas das argamassas biaditivadas e multifuncionais (parte 1).

Amostra	Teor de água [%]	Densidade aparente [Kg/m ³]	Mód. de elasticidade [MPa]	Resist. à flexão [MPa]	Resist. à compressão [MPa]
A1SAP7,5V	47,5	955	1183	1,06	0,78
A1SAP10V	52,0	932	1033	0,86	0,59
A1SAP2,2F	42,0	1187	1180	1,26	0,88
A1SAP4,3F	52,5	1061	1016	1,25	0,66
A1SAP2,4C	43,5	1122	718	0,90	0,59
A1SAP4,7C	55,3	918	1323	0,52	0,52
A2nT1SAP2,2F	57,9	1036	982	0,50	0,69
A2nT1SAP4,3F	63,2	1004	593	0,42	0,57
A2nT1SAP2,4C	55,1	994	700	0,36	0,56
A2nT1SAP4,7C	62,6	901	507	0,40	0,44
A2nT1SAP4,3F20P	62,5	839	348	0,47	0,80

* Apenas os valores médios são apresentados sendo os respectivos desvios padrão apresentados no corpo do texto.

Tabela A.4: Propriedades físicas e mecânicas das argamassas biaditivadas e multifuncionais (parte 2).

Amostra	Porosidade aberta [%]	Absorção de água [%]	Coef. de capilaridade [Kg/m ² .√min]	Valor assíptótico [Kg/m ²]	Índice de secagem [Kg/(m ² .h)]
A1SAP7,5V	36,0	37,8	1,57	35,60	0,097
A1SAP10V	34,2	36,7	2,33	33,79	0,096
A1SAP2,2F	35,1	29,5	2,09	31,20	0,031
A1SAP4,3F	41,4	39,0	3,15	38,06	0,034
A1SAP2,4C	35,3	31,4	2,27	31,22	0,136
A1SAP4,7C	39,1	42,5	2,49	33,68	0,036
A2nT1SAP2,2F	37,0	35,7	2,92	37,08	0,032
A2nT1SAP4,3F	43,9	42,8	3,41	41,43	0,037
A2nT1SAP2,4C	41,1	41,3	2,11	37,02	0,175
A2nT1SAP4,7C	40,1	44,5	2,40	37,80	0,051
A2nT1SAP4,3F20P	49,8	59,6	2,80	32,08	0,181

* Apenas os valores médios são apresentados sendo os respectivos desvios padrão apresentados no corpo do texto.

Apêndice B

Apêndice - Síntese das propriedades funcionais das argamassas

Tabela B.1: Propriedades funcionais da argamassa referência e de argamassas mono, bi e multiaditivadas.

Amostra	Características térmicas				Taxa de degradação de NO _x			Cap. higroscópica
	Ciclo 1		Ciclo 2		Radiação visível 0,2ppmv [%]	Radiação solar		MBV [g/m ² Δ%HR]
	T. máx. [°C]	T. mín. [°C]	T. máx. [°C]	T. mín. [°C]		0,2ppmv [%]	0,5ppmv [%]	
TD25 ^{*2}	28,9	11,2	57,3	13,4	1,9	6,8	2,8	1,27
A20P	25,5	12,7	55,2	18	-	-	-	-
A1nT	-	-	-	-	1,9	17,7	8,5	-
A2nT	-	-	-	-	1,9	33,2	14,5	-
A4nT	-	-	-	-	2,4	46,2	29,5	-
A1SAP	-	-	-	-	-	-	-	1,96
A5V	-	-	-	-	-	-	-	1,24
A7,5V	-	-	-	-	-	-	-	1,06
A10V	-	-	-	-	-	-	-	1,26
A15V	-	-	-	-	-	-	-	0,96
A2,2F	-	-	-	-	-	-	-	1,43
A4,3F	-	-	-	-	-	-	-	1,77
A2,4C	-	-	-	-	-	-	-	1,14
A4,7C	-	-	-	-	-	-	-	1,24
A1SAP7,5V	-	-	-	-	-	-	-	1,30
A1SAP10V	-	-	-	-	-	-	-	1,14
A1SAP2,2F	-	-	-	-	-	-	-	2,08
A1SAP4,3F	-	-	-	-	-	-	-	2,30
A1SAP2,4C	-	-	-	-	-	-	-	1,78
A1SAP4,7C	-	-	-	-	-	-	-	1,70
A2nT1SAP2,2F	-	-	-	-	-	-	-	1,99
A2nT1SAP4,3F	-	-	-	-	-	-	-	2,35
A2nT1SAP2,4C	-	-	-	-	-	-	-	2,00
A2nT1SAP4,7C	-	-	-	-	-	-	-	1,78
A2nT1SAP4,3F20P	27,2	12,5	58,1	16,4	-	15,4	9,4	1,95

* As propriedades funcionais das formulações excluídas por critérios físicos e mecânicos não foram aferidas.

^{*2} Formulação preparada com teor de adição de superplastificante de 0,25% e tomada como referência.

Apêndice C

Apêndice - Ensaios *MBV*

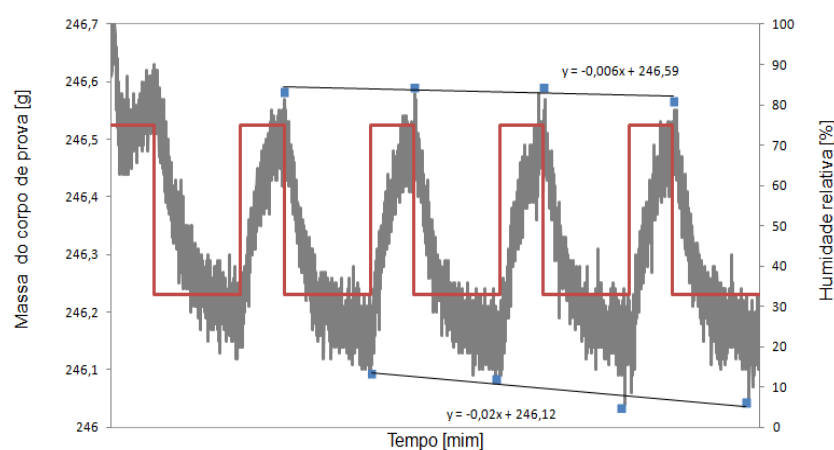


Figura C.1: Variação da massa da argamassa A7,5V registrada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

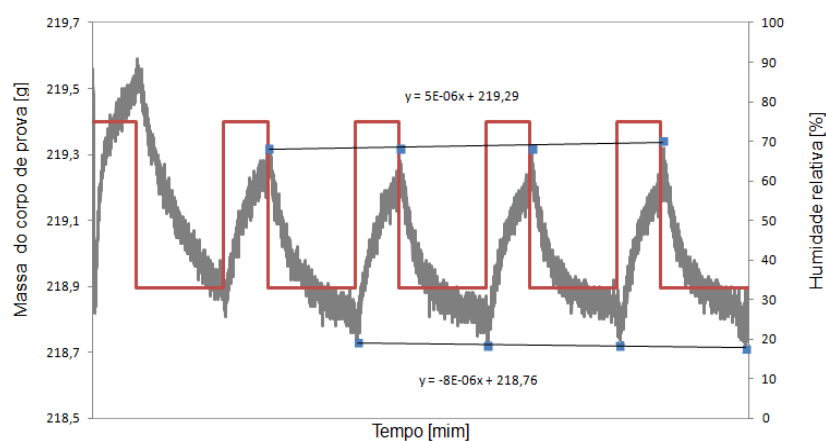


Figura C.2: Variação da massa da argamassa A10V registrada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

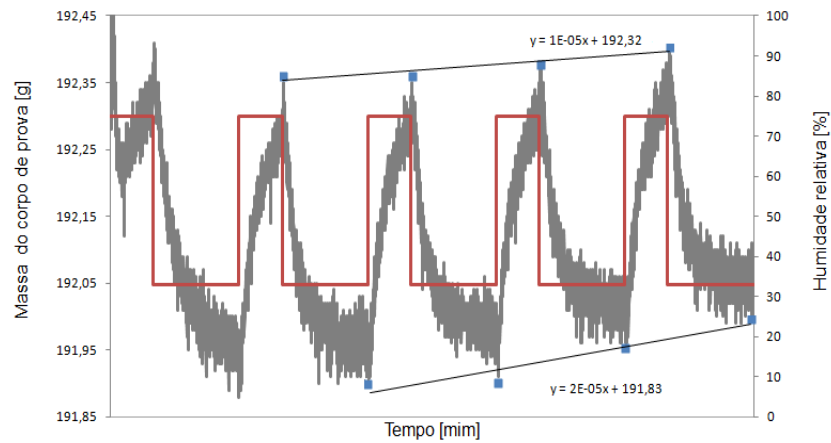


Figura C.3: Variação da massa da argamassa A15V registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

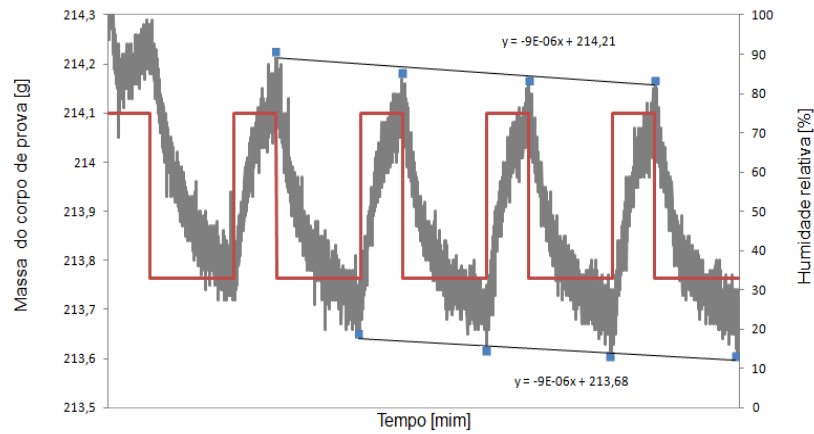


Figura C.4: Variação da massa da argamassa A1SAP10V registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

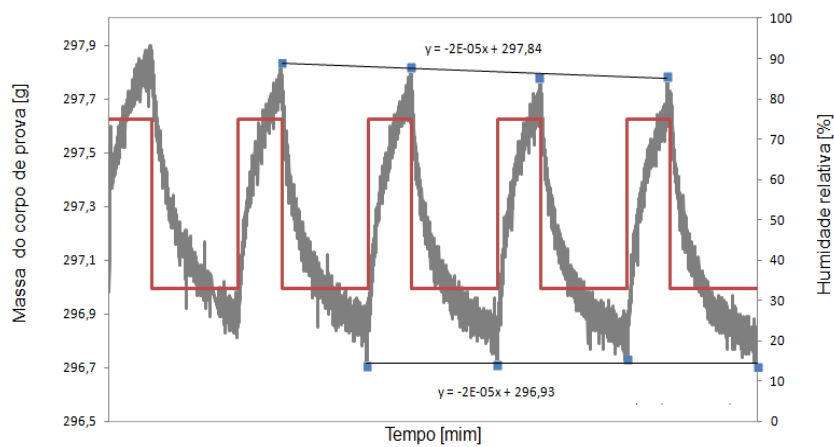


Figura C.5: Variação da massa da argamassa A1SAP2,2F registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

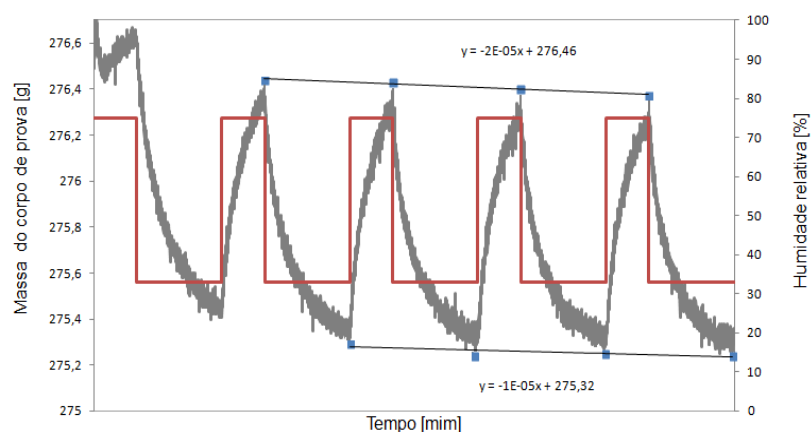


Figura C.6: Variação da massa da argamassa A1SAP4,3F registada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

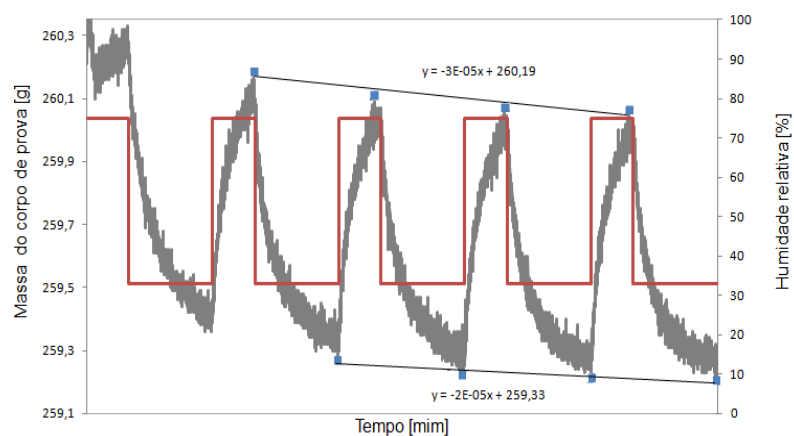


Figura C.7: Variação da massa da argamassa A1SAP2,4C registada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

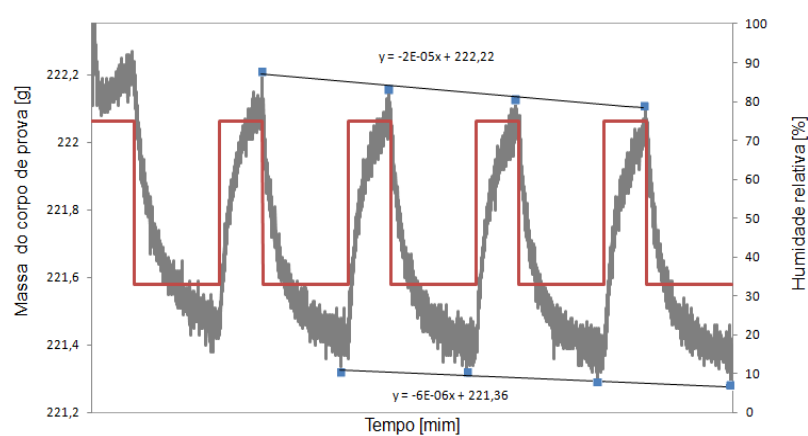


Figura C.8: Variação da massa da argamassa A1SAP4,7C registada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

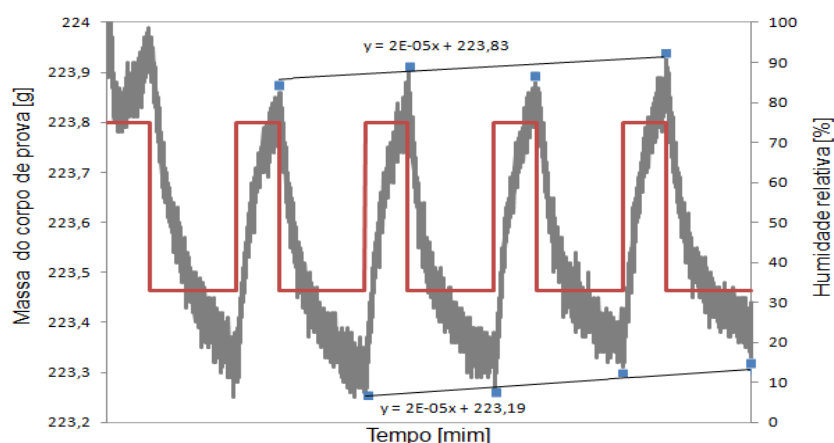


Figura C.9: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP7,5V registrada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

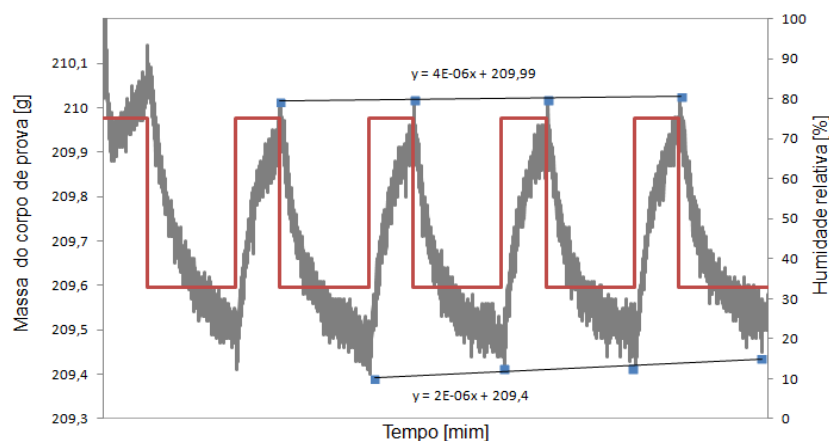


Figura C.10: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP10V registrada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

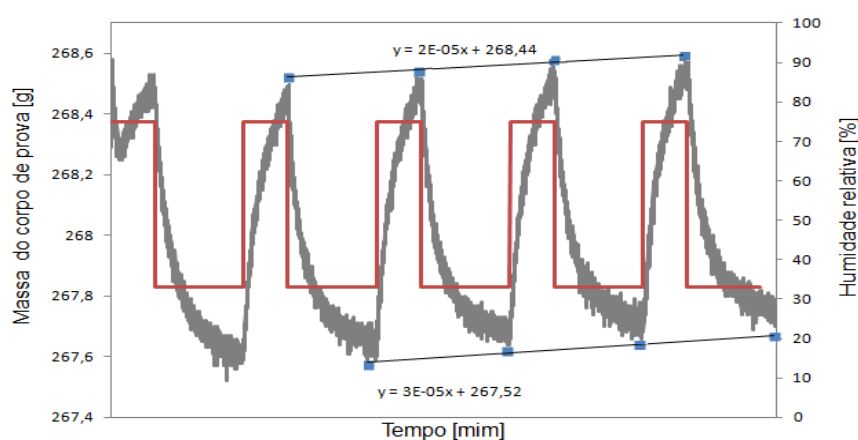


Figura C.11: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP2,2F registrada ao longo dos ciclos de variação de umidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

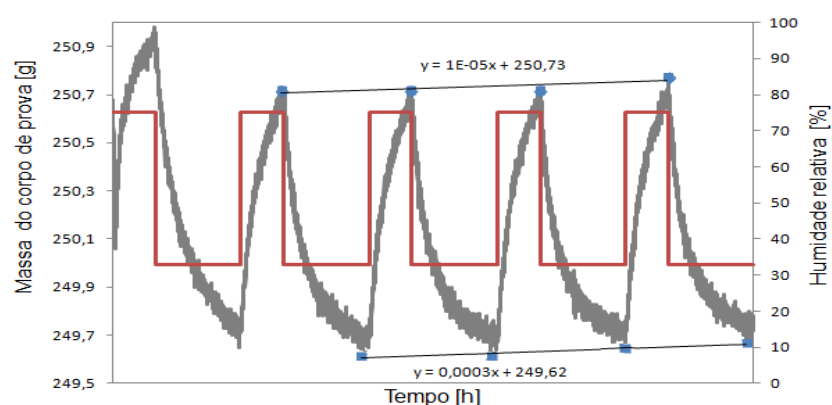


Figura C.12: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP4,3F registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

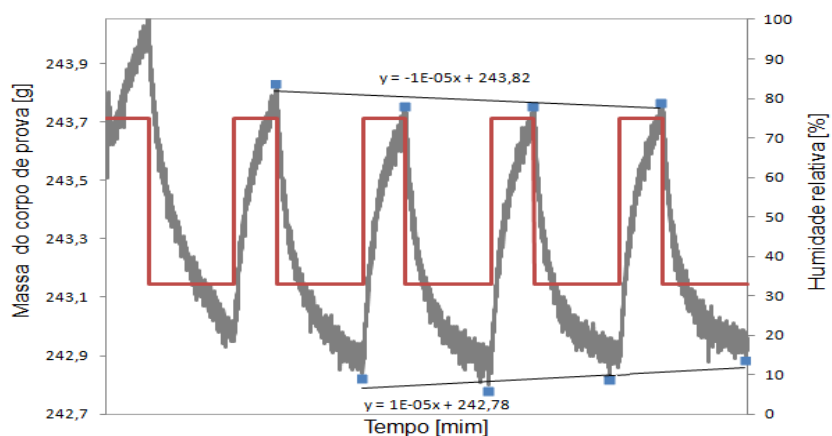


Figura C.13: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP2,4C registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.

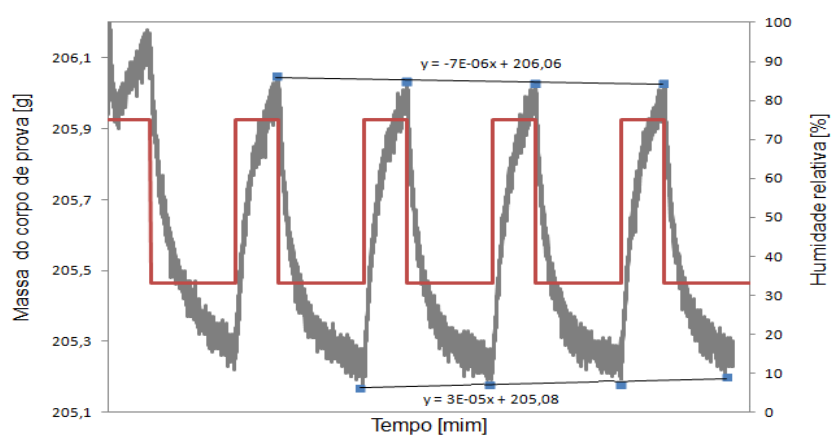


Figura C.14: Variação da massa da argamassa A2nT1SAP4,7C registada ao longo dos ciclos de variação de humidade relativa segundo metodologia *NordTest*.